

Prefacio

La extensa aplicabilidad de las nuevas tecnologías en la innovación y constante regeneración de las existentes (como lo es el campo de la ingeniería civil y el sector construcción), permite a los nuevos investigadores de diversos campos obtener nuevos recursos y mejoras en cada uno de sus sectores.

La presente investigación se basa en la producción de un nuevo material para la construcción, específicamente arena para morteros hidráulicos, a partir de los precipitados finales que se generan al tratar desechos sólidos con tecnología de plasma.

Estos precipitados sólidos son el producto final del sistema **PEM™** (Plasma Enhanced Melter™), realizado en los laboratorios de la compañía **Integrated Environmental Technologies** en Estados Unidos, el cual consiste en brindarle un tratamiento, a partir de tecnología de plasma, a todo tipo de basura producida por el ser humano.

La importancia y aplicabilidad de este material en la industria de la construcción es incuestionable, básicamente, se está cerrando el “ciclo de tratamiento ambiental” de este proceso.

El objetivo primordial de este proyecto es encontrar la aplicabilidad de las adiciones del nuevo material en las propiedades mecánicas de los morteros hidráulicos por estudiar.

Es meritorio brindar un agradecimiento especial a las siguientes personas, empresas e instituciones, quienes participaron en forma activa y desinteresada en cada una de las fases de esta investigación:

Ad Astra Rocket Company Costa Rica:

Gracias por confiar en el talento de los costarricenses para el desarrollo innovador de la tecnología aeroespacial del mundo.

Integrated Environmental Technologies:

Muchas gracias por facilitar el material con el que se fabricó la arena artificial. Sin su colaboración habría sido imposible realizar esta investigación.

Chang Díaz & Asociados: Ustedes fueron parte vital de este proyecto y son parte de mi vida diaria profesional. Muchas gracias.

Rex Cargo: Un agradecimiento profundo por patrocinar el envío del material desde Estados Unidos hacia Costa Rica.

Centro de Investigaciones en Vivienda y Construcción (CIVCO), Escuela de Ciencia e Ingeniería de los Materiales, ITCR: Gracias por permitir a este servidor hacer uso de las instalaciones y equipos de sus laboratorios.

Ing. Ronald Chang Díaz: Gracias por darme esta oportunidad y enseñarme a creer que no existen límites para los sueños y el intelecto del ser humano.

A todas estas personas, muchas gracias por su colaboración:

Ing. Hugo Navarro Serrano.
Ing. Jorge Chávez Corrales.
Ing. Mario Conejo.
Ing. Mauricio Araya.
Ing. Norman Chang Díaz.
Ing. Rolando Fournier Zepeda.
Ing. Ronald Jiménez Salas.
Sr. Eduardo Arce Mena.
Sr. Erick Sánchez López.
Sr. Manuel Montenegro Romero.

A mis padres, mi novia Carolina, mis hermanos y amigos, en especial Chch, Ran y César, gracias por su apoyo incondicional.

Resumen ejecutivo

Se pretendió proporcionar al sector construcción costarricense una alternativa para **reaprovechar el residuo** (material vítreo de estructura química similar al sílice) que es producto del tratamiento de desechos con tecnología de plasma. Es posible obtener una especie de arena sílica al pulverizar dicho material, la cual será utilizada como constituyente de morteros hidráulicos.

Entre las limitaciones que se presentaron se encuentra principalmente la fuente de los residuos, pues el proceso de tratamiento con plasma de desechos se realiza en Estados Unidos. Por esta razón, fue necesario importar 250 kg de este material vía mar, proceso que demoró un poco más de lo pronosticado.

El presente proyecto comenzó con el desarrollo de un método de pulverización del residuo vítreo, el cual se realizó con ayuda del equipo existente (quebrador industrial y molino mineralógico) en los laboratorios de la Escuela de Ciencia e Ingeniería de los Materiales del Instituto Tecnológico de Costa Rica. Como producto final de este proceso, se obtuvo una arena artificial

con una granulometría similar al de una arena natural.

Superada esta etapa, se realizaron ensayos comparatorios de las propiedades mecánicas de los morteros con diferentes porcentajes de sustitución de la arena artificial (0%, 10%, 20%, 50%, 70% y 100%), con lo cual se buscó obtener un correcto parámetro sobre el grado de beneficio/perjuicio real que se puede alcanzar al adicionar la arena sílica.

Los resultados obtenidos a partir de los ensayos permitieron llegar a la conclusión de que la arena artificial tiene un comportamiento muy similar al de la arena natural. Las diferencias en cuanto a la resistencia a esfuerzos de compresión, según ASTM C-305, ASTM C-230 y ASTM C-109, no es mucha al variar los porcentajes de sustitución, excepto para el caso de la sustitución de un 100% de arena artificial, en la cual la diferencia de resistencia sí se vuelve significativa. Lo anterior se puede observar en la Figura 1.

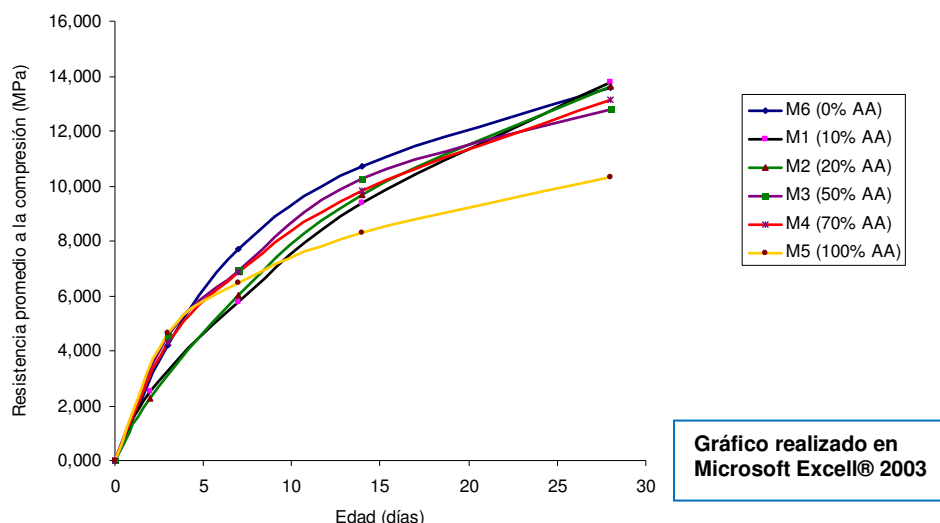


Figura 1. Curvas de resistencia a la compresión para cada uno de los porcentajes de adición de arena artificial.

Las variaciones entre los valores de resistencia a los 28 días de acuerdo con los porcentajes de sustitución de arena artificial rondan el de **1 MPa**, en orden inversamente proporcional en relación con la cantidad de arena artificial que se añade a la mezcla de mortero. Para el caso de la sustitución de un 100% de arena artificial, la diferencia es de aproximadamente 3 MPa, al compararse con la media de resultados para la misma edad.

En otras palabras, la resistencia a la compresión del mortero hidráulico hasta un 70% de sustitución de arena artificial, tiende a bajar conforme aumenta la cantidad de esta arena, pero esta reducción en la resistencia no es tan significativa como para que no se le pueda utilizar como material de construcción, cumpliendo inclusive, con los requerimientos estipulados en las normas internacionales y nacionales, clasificándose para casi todas las variaciones de sustitución, excepto la de 100% de arena artificial (según la norma ASTM C-270), como un **mortero**

tipo S, apto para todas las aplicaciones de un mortero (tanto de pega como de repello).

También, al haberse realizado los ensayos de granulometría y gravedad específica para el agregado fino (ASTM C-128), se demostró que las características de la arena producida mediante un sistema de pulverización, no difieren sustancialmente de los de una arena natural. La curva granulométrica del agregado fino artificial examinado, **no se separa** en gran medida de la curva del agregado natural, ambos con valores (o puntos) de dichas curvas por fuera de las especificaciones, según lo muestra la Figura 2. Incluso, una de las principales preocupaciones, el hecho de que eventualmente la arena artificial poseyera porcentajes de absorción casi nulos, se vio despejada al obtener los resultados de la prueba de gravedad específica y absorción, donde dicha arena obtuvo porcentajes de absorción muy similares a la arena natural (**4.51%** para la arena natural y **4.23%** para la arena artificial).

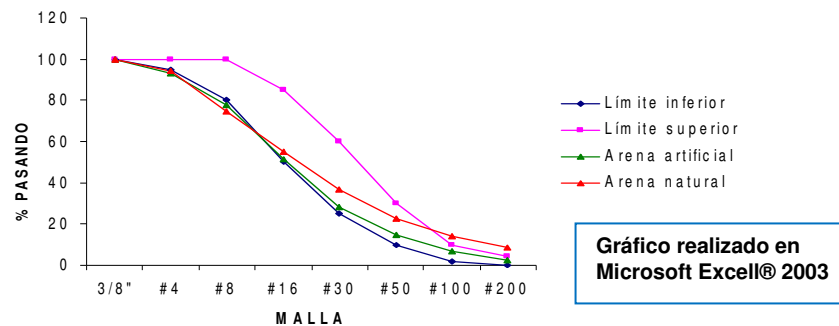


Figura 2. Curvas granulométricas para la arena artificial y natural.

Finalmente, y con los resultados de las pruebas de laboratorio debidamente tabuladas, se procedió a realizar una prueba de campo para el material. Se seleccionó el porcentaje de sustitución de un **50%** de arena artificial, esto por tener mejores características de trabajabilidad de la pasta de mortero y flujo producido más cercano a lo exigido como mínimo por la norma ASTM C-270.

Al realizar este experimento, primero se decidió hacer un “pañó de prueba” con el mortero, para así observar su comportamiento durante 7 días, con el fin de poder identificar eventuales problemas de agrietamiento o adherencia del material a la superficie de concreto existente.

Durante la semana en que se hicieron estas observaciones, no se encontraron problemas identificables a un mal comportamiento de la arena. Es decir, el paño de mortero con sustitución a un 50% de arena artificial se comportó de la misma manera, como lo haría un paño de mortero con 100% de arena natural.

Con el desarrollo de este proyecto, la Escuela de Ingeniería en Construcción del Instituto Tecnológico de Costa Rica, en conjunto con Ad Astra Rocket Company Co., está jugando un papel protagónico en la generación de nuevas tecnologías para la implementación de una verdadera cultura de desarrollo sostenible en la República de Costa Rica.

Introducción

El objetivo general de este proyecto es desarrollar una investigación con la que se pueda determinar la aplicabilidad de los precipitados sólidos provenientes del tratamiento de desechos expuestos al plasma en las propiedades mecánicas de los morteros hidráulicos, mediante la sustitución de diferentes cantidades de este material (previamente triturado y pulverizado hasta convertirlo en arena artificial). El área de la ingeniería donde se desarrolla esta investigación es en la **mecánica de materiales e ingeniería estructural**, buscando desde el inicio de la misma la obtención de parámetros confiables en los cuales se puedan basar investigaciones futuras. Como objetivos específicos se espera:

- Desarrollar un método de pulverización de los precipitados sólidos residuales.
- Estudiar y caracterizar las propiedades y estructura química del precipitado sólido residual.
- Realizar una serie de pruebas de laboratorio para determinar las propiedades de los morteros hidráulicos con sustituciones en porcentajes variados de arenas artificiales provenientes del proceso de pulverización de los precipitados.
- Realizar una prueba de campo con el porcentaje de sustitución de material artificial que mejor resultados brinde en cuanto a trabajabilidad y resistencia, y determinar sus características principales, tanto antes como después de la fragua.

- Realizar un análisis de costos que permita comparar la producción de arena artificial con respecto a la natural.

En general, el proyecto se pudo desarrollar correctamente, siguiendo todos los parámetros de estudio y diseño encontrados durante la investigación bibliográfica. Cabe recalcar que gran parte de los resultados que se obtendrán en la presente investigación no podrán ser correlacionados o comparados con ninguna otra prueba o resultados preexistentes, pues se carece de información suficiente sobre ensayos similares. Es por esta razón que se decidió comparar los resultados de las diferentes pruebas de laboratorio para la arena artificial con los de la natural, mediante pruebas realizadas en el mismo lugar y en forma simultánea.

La fuente más confiable de parámetros de comparación para este caso es la ASTM, que a su vez permite estandarizar los procedimientos de los ensayos, para que los mismos puedan ser repetidos por cualquier persona en un futuro.

Marco Teórico

La tecnología de plasma y el proceso de tratamiento de desechos PEMTM:

El plasma, conocido también como el cuarto estado de la materia, abunda en el espacio, es común observarlo en la naturaleza en forma de relámpagos, el sol y las estrellas nebulosas. El hombre también ha aprendido a producir plasma en medios artificiales, mediante diversos procesos que varían de acuerdo con la finalidad de la aplicación.

Uno de estos procesos integra la tecnología de plasma con el tratamiento y reutilización de desechos, conocido como PEMTM (Plasma Enhanced Melter). El sistema PEMTM provee una manera revolucionaria de acabar con dos de los más serios problemas que posee la sociedad de hoy: el tratamiento y disposición de los desechos y fuentes de energía limpia. Este sistema es desarrollado en Estados Unidos por la compañía IET (Integrated Environmental Technologies, LLC), la cual está convencida de que este método de tratamiento es superior a todos los actuales, por sus ventajas a nivel económico y ambiental, además de sus posibilidades para ser utilizado en una gran variedad de aplicaciones, incluyendo la distribución de energía derivada del proceso de tratamiento. Estas ventajas proveen menores costos derivados para el consumidor, generación opcional de energía *in situ*, una mayor utilización de los materiales de desecho para productos comerciales, un valor secundario remunerativo para estos productos, operaciones amigables con el ambiente y una minimización futura del riesgo de los desechos.

El sistema PEMTM, usa el calentamiento a partir de las conducciones eléctricas de gas (plasma), en un sistema especial de gasificación

para convertir los desechos en productos de valor. Este sistema es efectivo en una gran cantidad de tipos de basura, incluyendo los más peligrosos: médicos, radioactivos, industriales, municipales y neumáticos. El atractivo ambiental de este proceso resulta de la prácticamente total gasificación de los materiales orgánicos (reducción considerable de volumen y peso) y una muy baja emisión de contaminantes ambientales.

En adición a la gran cantidad de ventajas a nivel ambiental, el PEMTM puede ser usado como parte de un sistema de distribución de energía. Dependiendo del tipo de basura, el sistema puede producir considerablemente más poder del que consume. Los sistemas combinados pueden ser instalados en una variedad de locaciones para proveer energía local y eliminar las interrupciones del servicio eléctrico y los costos asociados a éste. Al ser los desechos una parte del combustible, los costos se pueden contener y mantenerlos competitivos.

Plasma Enhanced Melter (PEMTM)

Consiste en una especie de “gran horno”, en el cual se pueden depositar los desechos y calentarlos hasta llevarlos a la temperatura en que alcanzan el estado de plasma. La Figura 3 muestra el PEMTM en las instalaciones del laboratorio:

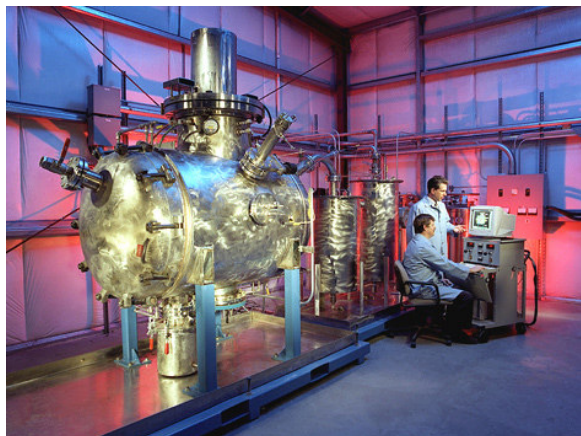


Figura 3. Plasma Enhanced Melter™

Internamente, el PEM™ funciona con un par de electrodos de grafito que forman el arco eléctrico que proporciona la energía necesaria, una resistencia volumétrica (calentador Joule, también de grafito) y un sistema de inyección de vapor/oxígeno.

Una vez que los desechos se han convertido en esta masa ionizada, es posible identificar tres componentes dentro del horno: el gas rico en hidrógeno que posteriormente pasará por un proceso de limpieza, el vidrio fundido y una capa de metal recuperable. Cuando se concluye se procede a bajar la temperatura en forma controlada y abrir las válvulas termales para depositar los residuos en receptáculos adecuados especialmente para este fin.

La compañía cree que el sistema PEM™ proporciona un mejoramiento substancial para el tratamiento de desechos en términos de costo, calidad ambiental, potencial de extracción de valor a los desechos y un gran rango de aplicación.

El sistema PEM™ emplea un calentamiento de plasma altamente controlable para obtener un sistema único de vitrificación de los desechos, fundamentalmente para alterar los materiales originales, convirtiendo la porción orgánica en un gas rico en hidrógeno sumamente útil, y la porción inorgánica en un sólido, no lixivante, similar al vidrio.

En este proceso los desechos son calentados, rompiendo los enlaces químicos de los componentes orgánicos, reformándolos en un proceso de gasificación para convertirlos en el gas. Los componentes inorgánicos son químicamente convertidos en un **óxido** (por ejemplo CaO , SiO_2), que se comienza a precipitar en un material vidrioso mediante un proceso llamado **vitrificación**, en donde el mismo es calentado hasta su punto de fusión.

El resultado es un material vidrioso que al terminar su proceso de enfriamiento, puede ser utilizado para diversos fines, en el caso de la presente investigación: como una **arena artificial** para aplicarla en las propiedades mecánicas de los morteros hidráulicos.

Las figuras 4, 5, 6 y 7 muestran en forma esquematizada dicho proceso, además del producto final:

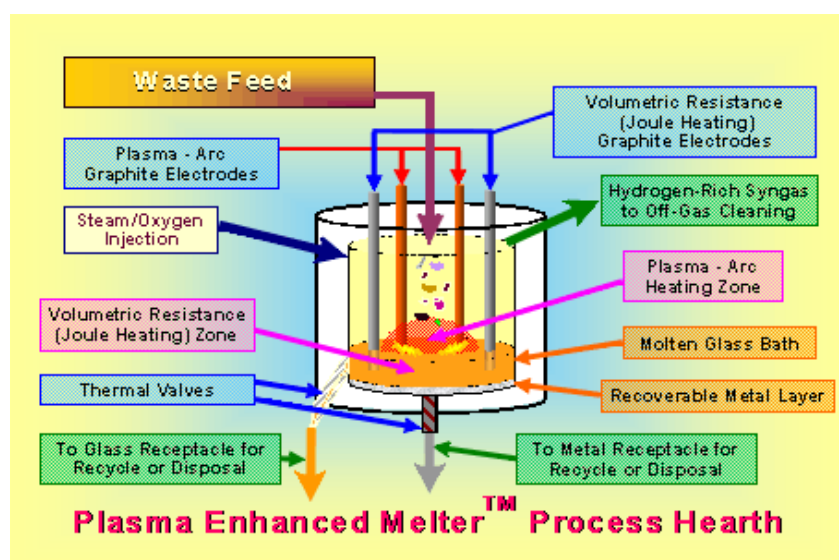


Figura 4. Esquematización del proceso.

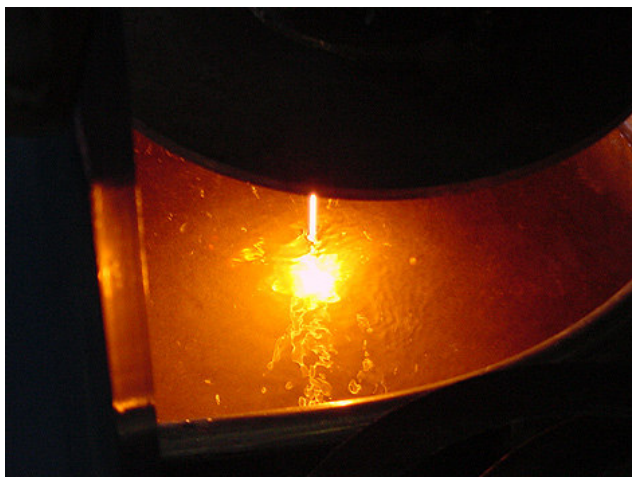


Figura 5. Desechos convertidos en vidrio fundido.

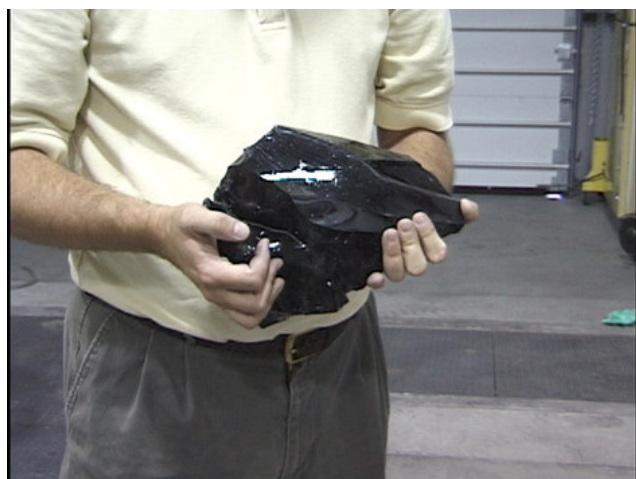


Figura 6. Vidrio solidificado.

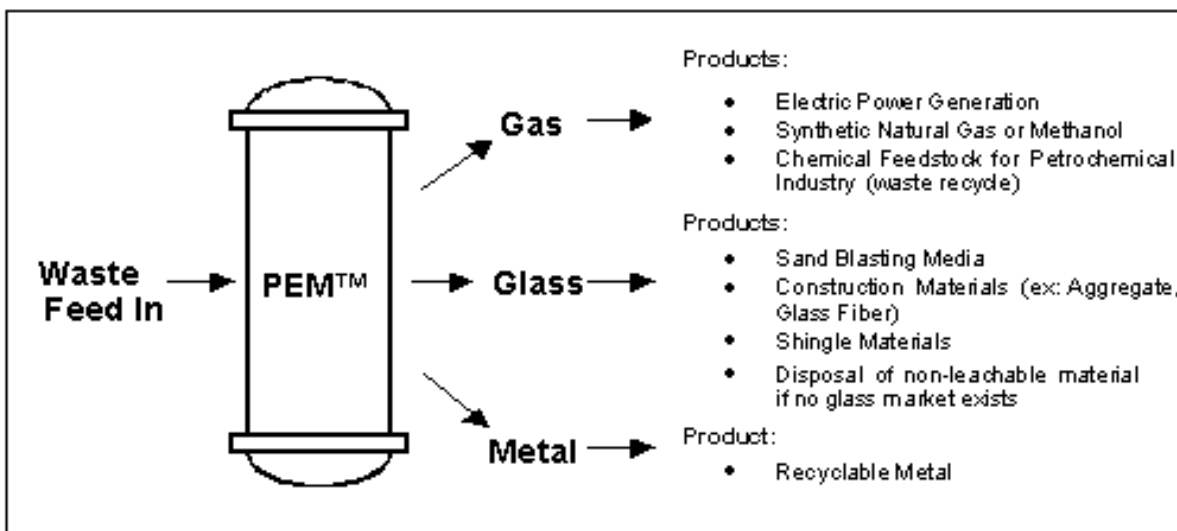


Figura 7. Productos que se pueden obtener a partir de cada uno de los niveles del sistema PEM™.

Gravedad específica de un agregado

Marco conceptual

Densidad absoluta o gravedad específica

El concepto de gravedad específica se refiere al volumen del material sólido, que excluye todos los poros y determina la relación del cuerpo sólido, con respecto al vacío y al peso del volumen de agua destilada libre de gas, ambos valores determinados a una temperatura específica. De manera que, a fin de determinar el efecto de poros impermeables completamente cerrados, el material tiene que pulverizarse. Se obtiene mediante una prueba laboriosa y sensible.

Si el volumen del cuerpo sólido se mide incluyendo los poros impermeables, no capilares, la densidad correspondiente lleva el calificativo de aparente. La densidad aparente es entonces la relación del peso del agregado seco al horno a 110 °C durante 24 horas con el peso del agua que ocupa el mismo volumen con todos los poros impermeables. La gravedad específica aparente también se define como la razón del peso en el aire de una unidad de volumen de la parte impermeable del agregado a una temperatura establecida con el peso en el aire de un volumen igual de agua destilada libre de gas a esa temperatura.

La densidad aparente del agregado depende de la densidad del mineral que compone el agregado y también de la cantidad de huecos. La mayoría de los agregados tienen una densidad o gravedad específica entre 2.5 y 3.0.

La gravedad específica es también generalmente un parámetro utilizado para calcular el volumen ocupado por el agregado en varias mezclas que contengan agregados incluyendo el concreto de cemento Portland, concreto pegajoso, y otros tipos de mezclas que

son proporcionadas o analizadas con base en el volumen absoluto. Además la gravedad específica es utilizada en el cálculo de los vacíos en agregados, por medio de la determinación del porcentaje de humedad para cada agregado. La gravedad específica masiva determinada con base en el agregado saturado superficie seca es usado si el agregado está mojado, es decir, si la absorción ha sido satisfecha. A diferencia, la gravedad específica determinada en base al agregado seco al horno es usado para cálculos cuando el agregado está seco o se asumió que estaba seco.

Porosidad y absorción del agregado

La presencia de los poros internos en las partículas de los agregados depende de la relación con la densidad para cada uno de los agregados y las características mismas de los poros, dado que son de gran importancia para el estudio de sus propiedades. La porosidad del agregado, su permeabilidad y su absorción tienen influencias en las propiedades del agregado, como la adherencia con el cemento, estabilidad química y la resistencia a la abrasión. La densidad aparente del agregado depende de su porosidad y en consecuencia, afecta el rendimiento del concreto para un agregado determinado.

Si algunos de los poros del agregado están llenos, se dice entonces que están saturados y a superficie seca. Si el agregado en estas condiciones se deja el aire, el agua contenida en los poros se evapora y el agregado estará menos saturado. Se puede alcanzar un estado seco mediante el horno.

La relación del incremento del peso de la muestra seca, expresado como porcentaje se llama **absorción**. La absorción también se define como el incremento en el peso del agregado debido al agua en los poros del material, pero sin

excluir el agua que se adhiere a la superficie de las partículas, expresada como un porcentaje del peso seco. El agregado se considera “seco” cuando se ha mantenido a una temperatura de $110 \pm 5^\circ\text{C}$ por suficiente tiempo para remover toda el agua.

Se utilizan los valores de absorción para calcular el cambio en el peso por la diferencia entre el agregado y el agua que absorbió en los espacios del poro dentro de las partículas constitutivas, comparadas a la condición seca, cuando se juzga que el agregado ha estado mucho tiempo en el contacto con el agua; bastante para satisfacer la mayoría del potencial de absorción. Algunos agregados minados, provenientes de debajo del nivel del agua pueden tener una absorción más alta cuando son usados, si no se les permitió secar. Recíprocamente, algún agregado cuando es utilizado puede contener una cantidad de humedad concentrada menor que cuando se empapó por 24 horas. Para un agregado que ha estado en contacto con el agua y que presenta humedad libre en la partícula, el porcentaje de humedad libre puede determinarse deduciendo la absorción de la humedad total satisfecha determinada por secado.

Aunque no hay una relación clara entre la resistencia del concreto y la absorción de agua en el agregado utilizado, los poros de la superficie de la partícula sí afectan la adherencia sobre la resistencia del concreto.

A continuación se presentan dos cuadros, uno con valores de gravedad específica bruta y otro con valores de capacidad de absorción que servirán para comparar los valores obtenidos en dichas condiciones. Estos cuadros no se deben tomar como especificaciones sino como un patrón de comparación. Tampoco sirven para descartar o aceptar un agregado a utilizar en una mezcla de concreto.

CUADRO 1. GRAVEDAD ESPECÍFICA DE VARIOS TIPOS DE PIEDRA USADA EN AGREGADOS.

Material	Gravedad específica bruto promedio	Rango
Arenisca	2.50	2.00-2.60
Piedra y grava	2.65	2.50-2.80
Piedra caliza	2.65	2.60-2.70
Granito	2.65	2.60-2.70
Roca	2.90	2.70-3.00

Tabla realizada en
Microsoft Excell® 2003

CUADRO 2. CAPACIDAD DE ABSORCIÓN APROXIMADA DE VARIOS TIPOS DE PIEDRA USADOS EN AGREGADOS.

Material	Capacidad de absorción, % por peso
Arena media	0-2
Grava media	$\frac{1}{2}$ -1
Roca granito	0-1/2
Piedra media	0-1/2
Material poroso muy ligero	Hasta 25

Tabla realizada en
Microsoft Excell® 2003

Morteros hidráulicos

Marco conceptual

Mortero

Se conoce como mortero a la **mezcla de aglomerante, arena y agua**. Al hacer contacto con el agua, la mezcla da lugar a una pasta plástica o fluida que después fragua y endurece por consecuencia de los procesos químicos que en ella se producen.

Este material es ampliamente utilizado en muchas aplicaciones de la construcción: el mortero se adhiere a las superficies irregulares de los ladrillos y bloques y da al conjunto cierta compacidad y resistencia a la compresión, además se usa en acabados de paredes en forma de repello.

Los morteros se denominan según el conglomerante utilizado: mortero de cal, de yeso o de cemento. Aquellos en los que intervienen dos conglomerantes reciben el nombre de morteros *bastardos*.

La diferencia entre un mortero y un concreto radica fundamentalmente en su uso y composición. El uso del concreto u hormigón es, generalmente, estructural y el mortero se utiliza normalmente en albañilería. Igualmente el tamaño máximo de agregado de un concreto es superior a 4 mm y el de un mortero es menor.

Mortero de pega

El mortero de pega es el elemento que une las unidades de mampostería a través de las juntas verticales y horizontales, en virtud de su capacidad de adherencia. Debe tener una buena plasticidad y consistencia para poderlo colocar de la manera adecuada y tener suficiente capacidad de retención de agua para que las unidades de mampostería no le roben un exceso de humedad y se pueda desarrollar la resistencia de la interfase mortero-unidad, mediando la correcta hidratación del cemento del mortero.

Por lo general está constituido por cemento, cal, arena, agua y aditivos. Se puede emplear cemento Pórtland corriente, o cemento para mampostería, el cual produce un mortero con mayor plasticidad y retención de agua.

Los morteros de pega se pueden clasificar como M, S, N y O, según la norma ASTM C-270, de acuerdo con su dosificación y con su resistencia a la compresión, flujo y retención de agua. Para mampostería estructural es recomendable sólo el empleo de morteros M, S y N, con las características que se indican en el Cuadro 3, queda el mortero tipo O para uso sólo en mampostería no estructural expuesta a la intemperie.

CUADRO 3. CARACTERÍSTICAS DEL MORTERO DE PEGA PARA MAMPOSTERÍA SEGÚN ASTM C-270								
Características				Composición (Dosificación por peso)				
Tipo	Resistencia a la compresión f_{cp} (MPa)	Flujo mínimo (%)	Retención de agua mínima (%)	Cemento Pórtland	Cal Hidratada	Cemento para Mamp.	Arena	
							Mínimo	Máximo
M	17.50	120	75	1.00	0.25	No aplica	2.25	3.00
				1.00	No aplica	1.00	2.25	2.50
S	12.50	115	75	1.00	0.25-0.50	No aplica	2.50	3.50
				0.50	No aplica	1.00	2.50	3.00
N	7.50	110	75	1.00	0.50-1.25	No aplica	3.00	4.50
				0.00	No aplica	1.00	3.00	4.00
O	2.40	-	75	1.0	1.25-2.50	No aplica	2.25	3.00

Tabla realizada en Microsoft Excell® 2003

La resistencia a la compresión de los morteros de pega se mide en cubos de 50 mm de arista a los 28 días, siguiendo lo indicado en la norma ASTM C-109, o en cilindros de 75 mm de diámetro por 150 mm de altura, correlacionando sus resultados a los de cubos como referencia. Los ensayos de flujo y de retención de agua están descritos en la norma ASTM C-230 y ASTM C-91. El mortero tipo N únicamente se permite en sistemas con capacidad mínima de disipación de energía en el rango inelástico (DMI).

Arena para morteros

La arena para morteros puede ser natural o triturada. Debe estar libre de materiales contaminantes, impurezas orgánicas o arcilla; además de ser bien graduada, ya que de esto depende, en buena medida, que el mortero sea trabajable y adherente.

Resistencia a la compresión

La capacidad de un material para resistir esfuerzos que tienden a deformarlo, aplastándolo, es lo que se conoce como **resistencia a la compresión**. La resistencia a la compresión de un mortero o concreto se puede

definir como la máxima resistencia medida de un espécimen a carga axial. Generalmente se expresa en kilogramos por centímetro cuadrado (kg/cm^2) a una edad de 28 días. Para determinar la resistencia a la compresión, se realizan pruebas a especímenes de mortero o de concreto. En los Estados Unidos, a menos de que se especifique de otra manera, los ensayos a compresión de mortero se realizan sobre cubos de **5 cm de lado**. La resistencia del mortero a compresión es una propiedad física fundamental, y es frecuentemente empleada por los fabricantes para certificar al cliente la calidad del producto que se le ofrece. Por esta razón, es común encontrar resultados de pruebas realizadas en sus productos respaldados por procedimientos internacionales (ASTM, ACI) en los catálogos de los mismos. Los factores que inciden en la resistencia a la compresión de morteros y de concretos son:

- Relación agua / cemento
- Tipo de agregados, resistencia, cantidad y distribución por tamaño (granulometría).
- Uso de aditivos
- Sistemas de compactación mecánica o manual.
- Temperatura, curado y edad del mortero y/o concreto.

Características del mortero de pega y su control de calidad

El mortero en estado plástico debe fluir bien, ser trabajable, contar con una buena retención de agua y mantener dichas propiedades por largo tiempo. Además, debe adherirse bien a las unidades de mampostería y ser consistente entre una preparación de mezcla y la otra.

La propiedad esencial del mortero en estado plástico es la **trabajabilidad**, mediante la cual éste puede ser manipulado y esparcido con facilidad sobre la cara superior de las paredes de las unidades de mampostería y alcanzar un contacto íntimo y completo con las irregularidades de la superficie de éstas. Lo opuesto a un mortero plástico es un mortero áspero.

La trabajabilidad está directamente relacionada con la plasticidad e indirectamente con la viscosidad, la cohesión y la densidad. La trabajabilidad de un mortero es fácilmente reconocible por un buen albañil, pero no existe ensayo para cuantificarla ni para medir sus características. Comúnmente se acepta como medida de la trabajabilidad el ensayo de flujo descrito en la norma ASTM C-230.

La **retención de agua** es una propiedad que le permite al mortero conservar el agua necesaria para la hidratación del cemento con ambientes absorbentes como las superficies de las unidades de mampostería.

La retención de agua se mejora con la adición de un retenedor de agua, e incide mucho en el tiempo de endurecimiento del mortero y su resistencia final. Una mezcla incapaz de retener el agua no permite la hidratación de sus materiales cementantes.

El **tiempo de endurecimiento** del mortero es el paso del estado fluido al rígido de la mezcla.

La **adherencia** es una propiedad necesaria que se logra cuando las unidades de mampostería son de textura lisa y abierta. Para permitir la unión mecánica del mortero y la unidad, ésta debe tener una absorción adecuada, compatible con el mortero. Las unidades muy absorbentes sustraen el agua del mortero y no permiten la hidratación del cemento en la superficie que los une. Por el contrario, unidades

totalmente impermeables impiden la creación de una superficie de contacto. Es importante también que el mortero tenga la suficiente plasticidad y la retención de agua necesaria para que no se debilite la unión con la unidad, que debe ser tan íntima como sea posible.

De la adherencia mecánica entre las unidades y el mortero dependen las resistencias a esfuerzos de cortante y de tracción. Se puede concluir, entonces, que esta propiedad es de importancia vital para el correcto funcionamiento de muros sometidos a flexión o a cargas horizontales.

La adherencia se puede mejorar con morteros que tengan una apropiada dosificación, buena manejabilidad y posean una adecuada colocación.

Metodología

Las pruebas realizadas durante el presente proyecto tuvieron como locación los laboratorios del Centro de Investigaciones en Vivienda y Construcción (CIVCO) de la Escuela de Ingeniería en Construcción del Instituto Tecnológico de Costa Rica y los laboratorios de la Escuela de Ciencia e Ingeniería de los Materiales de esta misma institución.

Proceso de fabricación de la arena artificial

El proceso de fragmentación y pulverización de la arena artificial se efectuó durante la semana comprendida entre el 21 de agosto de 2007 hasta el 31 de agosto del mismo año.

La arena artificial se fabricó a partir de los precipitados sólidos residuales provenientes del método de tratamiento de desechos PEMTM, (Plasma Enhanced MelterTM). Este proceso es realizado en los laboratorios de la compañía Integrated Environmental Technologies, LLC, (INENTEC, LLC.), con sede en los Estados Unidos de América.

Fueron importados 250 kg de materia prima (precipitados sólidos) desde ese país. El aspecto del material es muy similar al de rocas ricas en dióxido de silicio. Estas “rocas” artificiales tienen dimensiones que varían entre las 2” y las 8” de diámetro aproximado, algunas poseen bordes filosos y son fáciles de ser quebradas en lascas, muy similares al vidrio, mientras que otras tienen una superficie porosa y son más similares a una roca natural. Estas diferencias, en apariencia, obedecen al tipo de desecho que se trató en los laboratorios de INENTECTM. En las figuras 8 y 9 se muestra en detalle la descripción anterior:



Figura 8. Material producto del tratamiento de desechos con el método PEMTM, con apariencia rocosa.



Figura 9. Material producto del tratamiento de desechos con el método PEMTM, con apariencia vidriosa.

Para poder obtener el tamaño de grano adecuado para la arena, se recurrió al uso de un quebrador y un molino mineralógico, los cuales se encuentran en las instalaciones del Laboratorio de la Escuela de Ciencia e Ingeniería de los Materiales, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

No se hizo distinción ni separación entre las diferentes texturas (rocosa y vidriosa) que se pudieron reconocer en la materia prima, esto pues al momento de integrar el material en el proceso de pulverización, se prefirió observar el comportamiento del material como un todo en su variabilidad de propiedades, dependiendo esto de la cantidad y distribución estadística de los diferentes tipos de desechos por tratar en el proceso de producción de la materia prima en los laboratorios de Estados Unidos.

Fragmentación inicial

Primeramente, se pasó el material por el quebrador, el cual permite reducirlo a un tamaño de grano que oscila entre 1/2" y 1" de diámetro aproximado. En las figuras 10, 11 y 12 se ilustra esta primera parte del proceso de producción de la arena artificial:



Figura 10. Quebrador mineralógico industrial.



Figura 11. Ingreso del material en la boca del quebrador.



Figura 12. Material fragmentado por acción del quebrador mineralógico industrial.

Pulverización

Como segundo paso, se procedió a disminuir más el tamaño de grano del material por medio de un molino mineralógico. Este artefacto funciona mediante un disco de acero de muy alta resistencia que puede ser regulado para obtener diferentes tamaños de partículas.

Para el caso del procedimiento desarrollado de pulverización, y como se sabía de antemano que se iba a trabajar con morteros (los cuales exigen granulometrías de arena fina) en combinaciones con arenas naturales, se decidió producir el material más fino posible, para así

poder acercarse al máximo a la granulometría de una arena natural.

Una vez regulado el disco del molino mineralógico, se introdujo el material en la boca del mismo para su pulverización. El resultado de esto fue un tamaño de partícula mucho menor que la obtenida por medio del quebrador, así, se generó una arena con un tamaño máximo de partícula de aproximadamente $3/16''$.

En las figuras 13, 14 y 15 es posible apreciar la segunda parte del proceso de pulverización de la arena artificial, el equipo empleado, así como el resultado final obtenido de este método.



Figura 14. Ingreso del material en la boca del molino.



Figura 13. Molino mineralógico industrial.



Figura 15. Material fragmentado por acción del molino mineralógico industrial.

Finalmente, la arena artificial está en condiciones de ser sometida a las pruebas. A la misma se le realizaron pruebas de granulometría, gravedad específica y espectrometría, antes de ser utilizada en la fabricación de morteros.

La figura 16 muestra en forma resumida el proceso de pulverización de la arena artificial:



Figura 16. Proceso de fabricación de la arena artificial.

Prueba de gravedad específica y absorción

Los ensayos de gravedad específica y absorción del agregado fino (ASTM C-128), se realizaron durante la semana comprendida entre el 10 y el 14 de septiembre de 2007, en las instalaciones del Centro de Investigaciones en Vivienda y Construcción del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Se realizó una prueba para una muestra de arena natural y otra para una muestra de arena artificial.

Para ambos casos se siguió el procedimiento de reducción de muestras de agregado a tamaño de prueba, estipulado por la norma ASTM C-702. En la Figura 17 es posible visualizar parte del equipo utilizado durante la reducción del tamaño de la muestra, o como generalmente se le conoce: "cuarteo":



Figura 17. Separador de muestras de agregado o "cuarteadora"

Equipo utilizado

El equipo necesario para la correcta realización de esta prueba se detalla seguidamente:

- Un picnómetro de 500 ml, con una incertidumbre de $\pm 0,1\text{cm}^3$.
- Un cono de bronce.
- Bandejas.
- Una cuchara sopera.
- Un apisonador de hierro,
- Una placa acrílica.
- Un beaker.
- Una plantilla eléctrica.
- Una balanza digital de $\pm 0,005\text{ g}$ de incertidumbre.
- Un horno.

En la Figura 18 se puede observar el equipo utilizado y el momento en que la prueba se está realizando para la arena artificial y natural.



Figura 18. Prueba de gravedad específica y absorción del agregado fino para las muestras de arena natural y artificial.

Procedimiento

- Saturar la muestra por 24 hrs, sumergida en agua.
- Determinar la condición de saturación a superficie seca para el agregado, esta se logra cuando al desmoldarlo del cono truncado de bronce con un golpe sobre la lámina acrílica en la que esta sentado el

cono, la forma del molde cónico formado por la arena se desmorona.

- Moldear el cono depositando arena en este con la mano, golpear 25 veces con el apisonador.
- El cono se llena del mismo modo y se enrasa el agregado sobrante. La condición de saturado superficie seca se define como: un punto en que la arena se desmorona por primera vez y debe tenerse cuidado de no secar el material más allá del punto definido.
- Determinar el peso total del picnómetro en el cual se colocó 500 g de arena en condición de superficie seca.
- Añadir agua en el picnómetro, extraer las burbujas de aire con la bomba de vacío, llenar el picnómetro hasta la marca de 500 ml
- Determinar el peso que estará compuesto por el peso del picnómetro, el peso del material y el peso del agua añadida.
- Sacar el agregado fino del picnómetro mediante el uso de un frasco lavado para extraer todas las partículas. Poner el agua y el agregado fino en un horno y secar hasta conseguir un peso constante a $110\text{ }^{\circ}\text{C}$, durante 24 horas y determinar el peso seco del agregado.
- Con los datos obtenidos calcular: gravedad específica bruta, gravedad específica en condición saturada superficie seca y el porcentaje de absorción.

Ecuaciones a utilizar

- *Gravedad específica bruta:*

$$\frac{A}{(B + D - C)}$$

- *Gravedad específica saturada superficie seca:*

$$\frac{D}{(B + D - C)}$$

- *Gravedad específica aparente:*

$$\frac{A}{(B + A - C)}$$

- *% Absorción:*

$$\left[\frac{(D - A)}{A} \right] * 100$$

Donde:

A = peso seco de la muestra (g).

B = peso del picnómetro lleno de agua (g).

C = peso del picnómetro + muestra + agua (g).

D = peso del agregado en condición saturado superficie seca (g).

Prueba de composición granulométrica del agregado fino

Estos ensayos se realizaron durante los días 17 y 18 de septiembre de 2007, en los laboratorios del Centro de Investigaciones en Vivienda y Construcción del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Se practicó una prueba para la muestra de arena natural y otra para la arena artificial, siguiendo las normas ASTM C-136-05 y ASTM C-117-04.

Equipo utilizado

El equipo necesario para este ensayo es el siguiente:

- Una plataforma mecánica vibradora para separación del agregado.
- Un juego de tamices estandarizados según la ASTM con los siguientes números: 3/8", N° 4, N° 8, N°16, N°30, N°50, N°100 y N°200, con charola y tapa.
- Una balanza digital de ± 0.005 g de incertidumbre.
- Recipientes metálicos y plásticos pequeños.
- Cepillos y brochas para limpieza de la malla.
- Un horno de secado especial de muestras.

En las Figuras 19 y 20 es posible observar parte del equipo utilizado durante la realización de estas pruebas:



Figura 19. Agitador mecánico y tamices necesarios para la prueba de granulometría.



Figura 20. Recipientes, tamices y material de limpieza para la prueba de granulometría.

Procedimiento

- Preparar el tamaño de muestra mediante el método estipulado por la norma ASTM C-702 (Cuarteo).
- Por ser agregado fino, el tamaño de la muestra debe ser, después del lavado, como mínimo de 300 g.

- Secar la muestra a una masa constante con una temperatura de 110 ± 5 °C, durante aproximadamente 24 horas.
- Realizar el procedimiento de lavado para determinar la cantidad de material más fino que el tamiz N° 200, según lo dicta la norma ASTM C-117.
- Colocar la muestra húmeda después del lavado en el horno, y volver a dejar secar a una temperatura de 110 ± 5 °C, hasta obtener una masa constante durante aproximadamente 24 horas.
- Seleccionar los tamices con las aberturas requeridas según las especificaciones que necesita el material a ser examinado.
- Ordenar los tamices en posición decreciente de abertura, desde la parte superior hasta la inferior.
- Colocar la muestra en la parte superior de los tamices.
- Agitar los tamices a mano, o por medio de un agitador mecánico, durante un periodo suficiente en el que no más del 1% de la masa retenida en cualquiera de los tamices pasará dicho tamiz durante 1 minuto de agitación continua a mano, como se describe a continuación: Levantar el tamiz individual, provisto de una tapa, en una posición ligeramente inclinada en una mano. Golpear un lado del tamiz rápida y suavemente, y con una posición frontal de la otra mano a una taza de aproximadamente 150 veces por minuto. Girar el tamiz a un sexto de revolución a intervalos de 25 golpes.
- Limitar la cantidad de material en la malla inicial, para que todas las partículas tengan la oportunidad de pasar correctamente por todas las aberturas de los tamices.
- Determinar la masa retenida en cada tamaño de tamiz, en una escala de balanza, al más cercano 0.1% del peso original seco.

Ecuaciones por utilizar

- Porcentajes:

Calcular los porcentajes pasando, total de porcentaje retenido y retenido acumulado al más cercano 0.1% de la masa total inicial seca antes de realizar la prueba. Incluir el porcentaje obtenido durante la realización del ensayo de lavado.

- Módulo de finura:

Calcular el módulo de finura, definido como la suma de los porcentajes totales de material que es más grueso que cada uno de los siguientes tamices (o porcentaje retenido acumulado) y dividiendo la suma entre 100: N° 100, N° 50, N° 30, N° 16, N° 8 y N° 4.

Prueba de resistencia a la compresión de un mortero hidráulico

Estos ensayos se realizaron durante la semana comprendida entre el 26 de septiembre y el 29 de octubre de 2007, en los laboratorios del Centro de Investigaciones en Vivienda y Construcción del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Se prepararon 6 muestras con diferentes porcentajes de sustitución de material artificial y natural, que van desde una arena totalmente natural (0% de arena artificial), hasta la totalidad (100% de arena artificial).

Las muestras fueron falladas en grupos de tres, a los 3, 7, 14 y 28 días.

Para todos los casos se siguió estrictamente el procedimiento estipulado por las normas ASTM C-109/C-109M-05, ASTM C-305-99, ASTM C-230/C-230M-03.

Equipo utilizado

Se necesita contar con el siguiente equipo para poder llevar a cabo el ensayo.

- **Balanza:** Para medir la masa de cemento y arena sílica. Con una incertidumbre no mayor a $\pm 1,0$ g.
- **Probeta:** Para determinar el volumen de agua a utilizar en la mezcla. Con una incertidumbre no mayor a $\pm 0,5$ ml.
- **Moldes:** Dos moldes de metal con tres compartimientos cada uno. La superficie de los mismos es untada con vaselina para facilitar la extracción de los cubos de mortero.
- **Mezcladora:** Consta de una paleta y una olla de mezclado. Funciona a velocidades media y baja.
- **Mesa de flujo:** La mesa de flujo está constituida por una plancha metálica horizontal, unida a un dispositivo que le permita un movimiento de subida hasta una altura de 15 mm y que manualmente le permita caer libremente desde esa altura, en promedio 25 caídas en 15 segundos. La plancha metálica tiene divisiones que indican la correcta posición del cono así como también los diámetros equidistantes.
- **Vernier:** Para medir los diámetros de la masa de mortero que resulta al completar las 25 caídas en la mesa de flujo.
- **Máquina para ensayo de compresión:** Le suministra a los especímenes una carga tal que estos alcanzan su máxima resistencia en un período comprendido entre los 20 segundos y 80 segundos.
- **Cono y pisón:** El cono sirve como recipiente del mortero fresco y tiene dimensiones estandarizadas; el pisón tiene una sección de 1 pulgada x 1/2 pulgada y sirve para compactar el mortero en el cono y en los moldes.
- **Cámara húmeda:** Debe mantener una humedad relativa superior a 90%.

Las Figuras 21, 22 y 23 muestran parte del equipo que se necesita durante la realización del ensayo.



Figura 21. Moldes con compartimentos cúbicos.



Figura 22. Mezcladora mecánica para el mortero.



Figura 23. Máquina para ensayos de compresión.

Procedimiento

- Determinar una masa de cemento Pórtland tipo I de 937,5 g y 2812,5 g de arena (en su totalidad, sin importar los porcentajes de combinación entre arena artificial y natural), de manera que se cumpla con una relación 1:3. Esto para hacer un total de 3750 g de mezcla para mortero, necesarios para llenar 4 moldes de cubos.
- Preparar el mortero con diferentes porcentajes de agua, con el fin de lograr una mezcla que cumpla con el rango de flujo especificado en la norma ASTM C-230.
- Una vez que el mortero cumpla con el rango de flujo, se procede a llenar los moldes mediante una cuidadosa compactación con el pisón, luego se enrasa sobre el nivel del molde. Se repite el proceso hasta llenar los seis moldes. En la Figura 24 se puede observar el proceso de llenado y compactación de los moldes, mientras que en la Figura 25 es posible observar los moldes llenos y a punto de ser enrasados.



Figura 24. Moldeo y compactación de los especímenes.



Figura 25. Especímenes compactados antes de ser enrasados.

- Los moldes llenos son llevados a la cámara húmeda y deben permanecer por 24 horas, debidamente cubiertos para evitar que el agua de la cámara pueda afectar la relación agua/cemento. Transcurrido este tiempo los mismos deben ser cuidadosamente desmoldados y ubicados nuevamente en la cámara húmeda, donde permanecen hasta que son fallados, de acuerdo con la edad requerida para conocer la resistencia a la compresión. En la Figura 26 se puede apreciar la cámara húmeda.



Figura 26. Cámara húmeda.

- A los 3 días de producido el mortero se fallan los primeros 3 especímenes de cada muestra, otros 3 son fallados a los 7 días, 3 a los 14 días y los últimos 3 son fallados a los 28 días, cuando se supone han alcanzado la resistencia especificada. En la Figura 27 se muestran los especímenes listos para ser fallados, en la Figura 28 es posible observar el procedimiento de falla de uno de los especímenes y en la Figura 29 se presenta el espécimen después de la falla.



Figura 27. Grupos de especímenes con diferentes porcentajes de sustitución de arena artificial listos para ser fallados.



Figura 28. Especimen de mortero sometido a cargas de compresión.

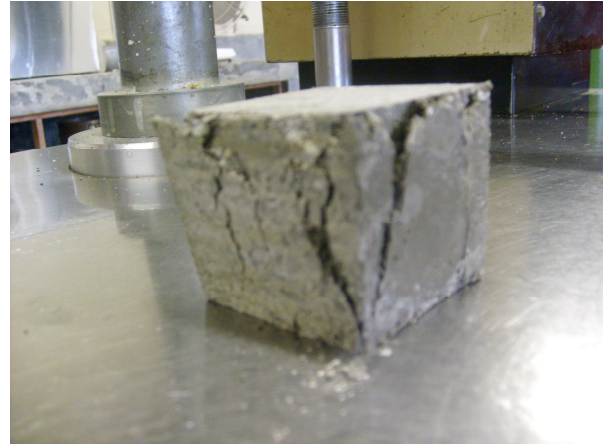


Figura 29. Especimen de 14 días de edad después de la falla.

Ecuaciones por utilizar

Para el cálculo del valor de flujo del mortero se utilizará la ecuación:

$$f = (\Delta \bar{D} / D_{\text{inic}}) * 100\%$$

Donde:

f : Valor del flujo (porcentaje)

D_{inic} : Diámetro inicial de la muestra de mortero (mm)

$\Delta \bar{D}$: Incremento promedio del diámetro con respecto al inicial (mm)

Para el cálculo de la resistencia a la compresión del espécimen de mortero, se utilizará la siguiente ecuación:

$$R_e = V / A_e$$

Donde:

R_e : Resistencia del espécimen (MPa)

V : Carga aplicada (kg).

A_e : Área de la cara del espécimen sometida a la carga de compresión (m²).

Nota: Para los cálculos anteriores, se estima el valor de los siguientes datos:

Diámetro inicial de la muestra de mortero:

$$D_{inic} = 101.6 \text{ mm.}$$

Área de la cara del espécimen sometida a la carga de compresión:

$$A_e = 2581 \text{ mm}^2 ; A_e = 0.002581 \text{ m}^2$$

Factor de corrección por calibración del equipo (A multiplicar cada uno de los valores de V que se leen de la máquina de ensayo de compresión):

$$k = 1.0549 \text{ (para V menor a 2700 kg).}$$

$$k = 1.0667 \text{ (para V mayor a 2700 kg).}$$

Prueba práctica de campo

Esta prueba se realizó durante la semana comprendida entre el 29 de octubre y el 5 de noviembre de 2007. Se prepararon dos paños de mortero de repello, uno para observar su comportamiento en interiores y otro para exteriores.

Se seleccionó la mezcla con aquel porcentaje de sustitución de arena artificial que mejor combinaba las características de flujo, trabajabilidad y resistencia a la compresión.

Se contó con la asesoría de un maestro de obras con más de 25 años de experiencia en obra gris (Sr. Manuel Montenegro Romero), quien brindó comentarios con respecto a la comodidad y trabajabilidad de la mezcla en estudio, comparándola con las mezclas convencionales que ha usado durante todos los años que tiene de estar inmerso en el ambiente de la industria de la construcción.

Se observó la mezcla durante una semana y transcurrido este tiempo se brindaron los comentarios correspondientes en cuanto a adherencia, agrietamientos, aspecto y calidad final, entre otros.

Resultados

De acuerdo con el procedimiento previamente estipulado en el apartado de metodología, y tomando en cuenta los conceptos teóricos ya definidos, se obtuvieron los siguientes resultados para cada una de las pruebas realizadas en la presente investigación.

Gravedad específica y absorción del agregado fino

Se realizó una prueba de gravedad específica y absorción, según ASTM C-128, tanto para la arena natural como la artificial. El Cuadro 4, resume los datos que se necesitaron para la prueba en la arena natural.

CUADRO 4. DATOS PARA LA DETERMINACIÓN DE LA GRAVEDAD ESPECÍFICA Y EL PORCENTAJE DE ABSORCIÓN EN LA ARENA NATURAL.	
Descripción	Peso (g)
W picnómetro N° 1 =	177,65
W picnómetro N° 1 y agua a 23 °C (B) =	675,35
W picnómetro N° 1 y muestra (SSS) =	677,85
W picnómetro con el espécimen y agua en la marca de calibración (C) =	979,20
W bandeja N° 6 =	428,30
W bandeja N° 6 y muestra seca =	926,90
Peso del espécimen seco al horno en el aire (A):	478,60
Peso del espécimen (SSS) (S):	500,20

Tabla realizada en Microsoft Excell® 2003

Con estos datos y las fórmulas suministradas anteriormente, es posible realizar los cálculos

necesarios para la obtención de la gravedad específica y el porcentaje de absorción de la arena natural. De esta manera, el Cuadro 5 muestra los resultados obtenidos.

CUADRO 5. RESULTADOS PARA LA PRUEBA DE GRAVEDAD ESPECÍFICA Y EL PORCENTAJE DE ABSORCIÓN EN LA ARENA NATURAL.	
Parámetro	Resultado
Gravedad específica masiva	2,44
Gravedad específica (SSS)	2,55
Gravedad específica aparente	2,74
Absorción	4,51%

Tabla realizada en Microsoft Excell® 2003

De igual manera, se realizó este mismo ensayo a la arena artificial, el Cuadro 6 presenta los datos desprendidos para la prueba.

CUADRO 6. DATOS PARA LA DETERMINACIÓN DE LA GRAVEDAD ESPECÍFICA Y EL PORCENTAJE DE ABSORCIÓN EN LA ARENA ARTIFICIAL.	
Descripción	Peso (g)
W picnómetro N° 1 =	177,64
W picnómetro N° 1 y agua a 23 °C (B) =	675,40
W picnómetro N° 1 y muestra (SSS) =	679,09
W picnómetro con el espécimen y agua en la marca de calibración (C) =	982,70
W bandeja N° 6 =	444,99
W bandeja N° 6 y muestra seca =	926,10
Peso del espécimen seco al horno en el aire (A):	481,11
Peso del espécimen (SSS) (S):	501,45

Tabla realizada en Microsoft Excell® 2003

Con base en estos valores se muestran en el Cuadro 7 los resultados de la prueba de gravedad específica y absorción.

CUADRO 7. RESULTADOS PARA LA PRUEBA DE GRAVEDAD ESPECÍFICA Y EL PORCENTAJE DE ABSORCIÓN EN LA ARENA ARTIFICIAL.	
Parámetro	Resultado
Gravedad específica masiva	2,48
Gravedad específica (SSS)	2,58
Gravedad específica aparente	2,77
Absorción	4,23%

Tabla realizada en Microsoft Excell® 2003

Prueba de composición granulométrica del agregado fino

Se realizó una prueba de composición granulométrica a cada una de las muestras (arena natural y artificial), siguiendo los procedimientos de toma de muestras y tamizado según lo estipula la ASTM C-702-98, ASTM C-136-05 y ASTM C-117-04.

En el Cuadro 8 se muestran los resultados de la toma de pesos iniciales de la muestra de arena natural, su peso seco y su peso después de habersele realizado el lavado para determinar el porcentaje pasando la malla N° 200, según lo estipula la norma ASTM C-117-04.

CUADRO 8. DATOS PREVIOS A LA REALIZACIÓN DEL TAMIZAJE DE LA MUESTRA DE ARENA NATURAL.	
Descripción	Peso (g)
W total de la muestra y bandeja	548,01
W bandeja	66,27
W total	481,74
W muestra seca y bandeja	523,41
W muestra seca	457,14
W muestra seca lavada y bandeja	483,38
W muestra seca lavada	417,11
W pasando malla N° 200	40,03
%W pasando malla N° 200	5,106

Tabla realizada en Microsoft Excell® 2003

Con estos datos es posible realizar la prueba de tamizado, según lo dicta la norma ASTM C-136-05. El Cuadro 9 resume los resultados.

CUADRO 9. COMPOSICIÓN GRANULOMÉTRICA DE LA MUESTRA DE ARENA NATURAL.						
MALLA	W retenido + band (g)	W retenido (g)	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Pasando	Especificación
3/8"	0	0,00	0,00	0	100	100
#4	93,12	26,85	5,86	5,86	94,14	95-100
#8	154,33	88,06	19,22	25,08	74,92	80-100
#16	158,4	92,13	20,11	45,20	54,80	50-85
#30	148,15	81,88	17,87	63,07	36,93	25-60
#50	132,85	66,58	14,53	77,60	22,40	10-30
#100	103,63	37,36	8,16	85,76	14,24	2-10
#200	91,48	25,21	5,50	91,26	8,74	0-4
Charola	-	40,03	8,74	100,00	0,00	-
Σ		458,1	100,00			

Tabla realizada en Microsoft Excell® 2003

A partir de los resultados obtenidos con la prueba de tamizaje, se grafica la curva granulométrica para este tipo de arena natural. La

figura 30 muestra dicha curva en conjunto con las especificaciones (límites), usada para las arenas.

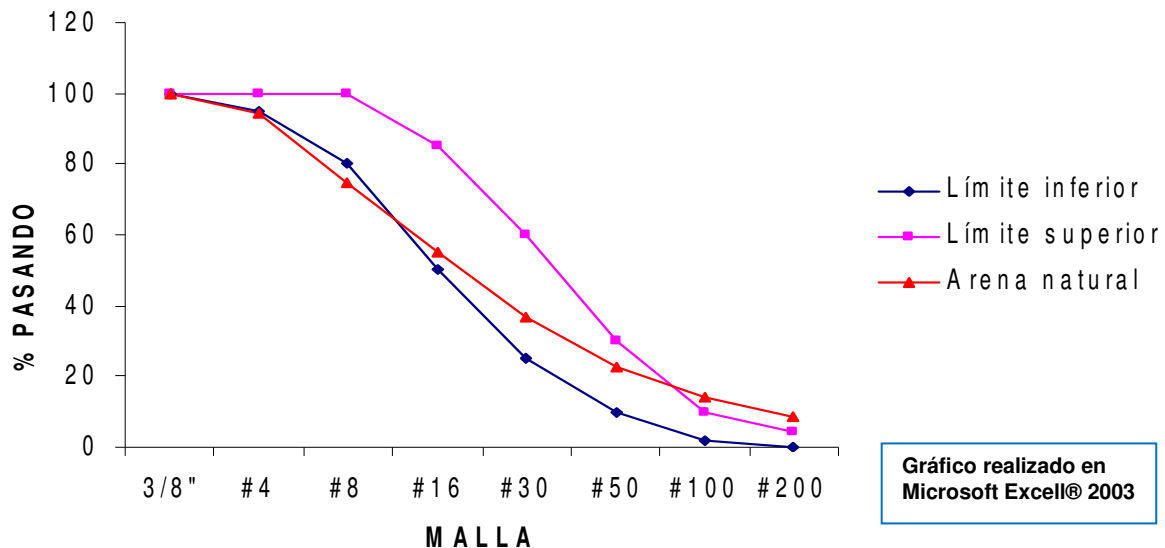


Figura 30. Curva granulométrica para la arena natural.

El módulo de finura del material es el resultado de la suma de todos los porcentajes retenidos acumulados hasta el tamiz N° 100 y dividiendo este resultado entre 100.

En el Cuadro 10 se observan los valores obtenidos para el pesaje en estado natural, seco y lavado de la muestra de arena artificial, determinando así, el porcentaje de material que pasa la malla N° 200.

$$MF = 3,026$$

CUADRO 10. DATOS PREVIOS A LA REALIZACIÓN DEL TAMIZAJE DE LA MUESTRA DE ARENA ARTIFICIAL.	
Descripción	Peso (g)
W total de la muestra y bandeja	499,05
W bandeja	64,09
W total	434,96
W muestra seca y bandeja	498,97
W muestra seca	434,88
W muestra seca lavada y bandeja	489,6
W muestra seca lavada	425,51
W pasando malla N° 200	9,37
%W pasando malla N° 200	0,018

Tabla realizada en Microsoft Excell® 2003

Una vez obtenidos estos datos se procede a realizar la prueba de tamizado, de acuerdo con la norma ASTM C-136-05. El Cuadro 11 muestra los

resultados obtenidos de este ensayo sobre la arena artificial en estudio.

CUADRO 11. COMPOSICIÓN GRANULOMÉTRICA DE LA MUESTRA DE ARENA ARTIFICIAL.						
MALLA	W retenido + band (g)	W retenido (g)	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Pasando	Especificación
3/8"	0	0,00	0,00	0	100	100
#4	94,11	30,02	6,91	6,91	93,09	95-100
#8	129,5	65,41	15,07	21,98	78,02	80-100
#16	179,65	115,56	26,62	48,60	51,40	50-85
#30	164,31	100,22	23,08	71,68	28,32	25-60
#50	123,87	59,78	13,77	85,45	14,55	10-30
#100	98,27	34,18	7,87	93,32	6,68	2-10
#200	83,72	19,63	4,52	97,84	2,16	0-4
Charola	-	9,37	2,16	100,00	0,00	-
Σ		434,17	100,00			

Tabla realizada en Microsoft Excell® 2003

De igual manera, se grafican los resultados a partir de este ensayo, para así obtener la curva

granulométrica respectiva. La Figura 31 muestra la curva y los límites respectivos.

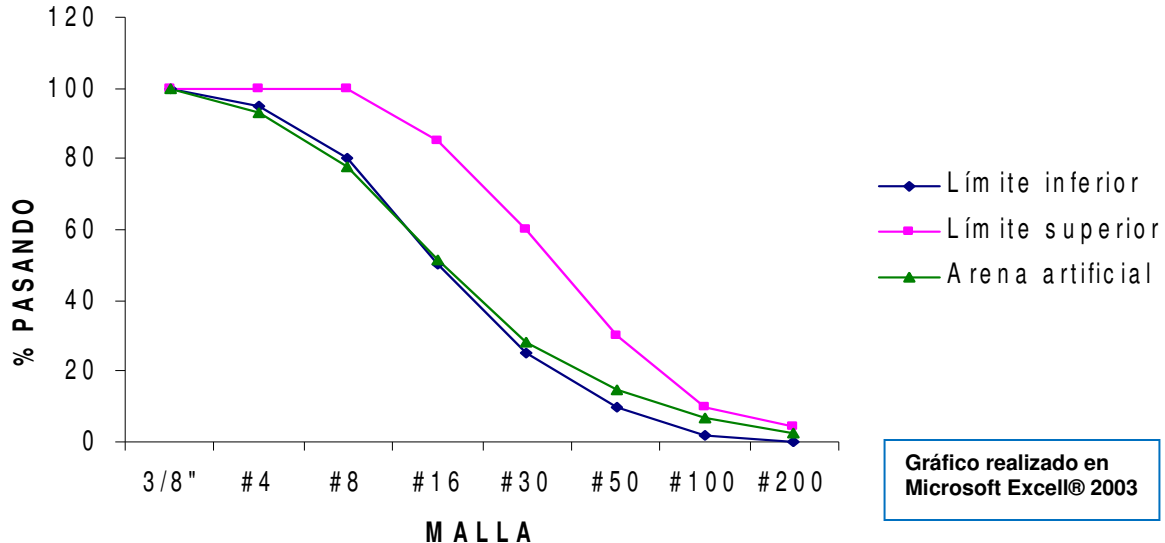


Gráfico realizado en Microsoft Excell® 2003

Figura 31. Curva granulométrica para la arena artificial.

De igual manera, se procede a calcular el módulo de finura de la arena artificial, obteniendo el siguiente resultado:

$$MF = 3,279$$

Graficando ambas curvas granulométricas en una sola figura, es más sencillo apreciar los

puntos en los que estos valores tienden a separarse más. La Figura 32 ilustra lo anterior.

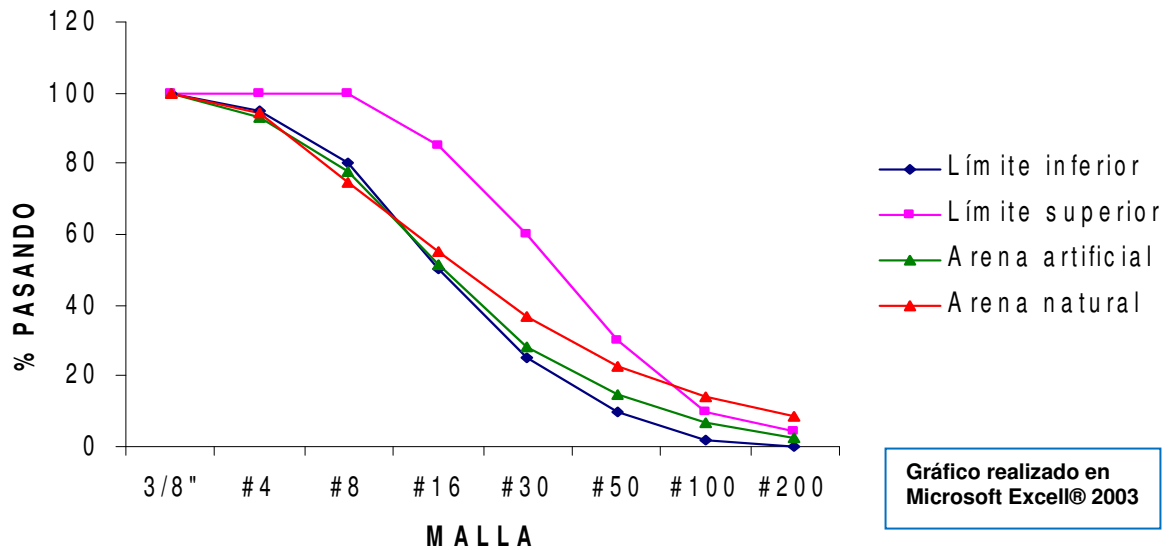


Figura 32. Curvas granulométricas para las arenas artificial y natural.

Prueba de Difractometría de Rayos X

Con el fin de determinar la composición química de la arena artificial, se realizó una prueba de difractometría de Rayos X en las instalaciones de los laboratorios del Centro de Investigación y Extensión en Materiales, de la Escuela de Ciencia e Ingeniería de los Materiales, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Las condiciones (ajustes de Goniómetro, características de RX) en las que se realizó dicha prueba se presentan en los Cuadros 12 y 13:

El espectro con el que el material reaccionó de acuerdo con el ángulo θ , el ángulo de exposición, la intensidad y la distancia interplanar entre la superficie y la fuente de emisión, se muestran en la Figura 33. Los “picos” más pronunciados son los que permiten caracterizar el material.

CUADRO 12. AJUSTES DE GONIÓMETRO PARA LA PRUEBA DE DIFRACTOMETRÍA DE RAYOS X EN LA ARENA ARTIFICIAL		
Parámetro	Magnitud	Unidades
Angulo de Inicio	12	°
Angulo final	100	°
Velocidad de avance	0,02	2O/s
Ámbito	2,00E+04	C/s
Constante de tiempo	1	s
Apertura	0,2	mm
Tensión	40	KV
Corriente	20	ma

Tabla realizada en
Microsoft Excell® 2003

CUADRO 13. CARACTERÍSTICAS DE RX	
Tubo	Cu
Filtro	Ni
Hora de Inicio	09:30:18 a.m.
Hora final	10:56:00 a.m.
Fecha	28-Aug-07
Difractograma #	185

Tabla realizada en
Microsoft Excell® 2003

El resultado final de la prueba indicó que el material con el que se está fabricando la arena artificial es, en su mayoría, **Silicato de Calcio**, de la variedad α (α CaSiO_3).

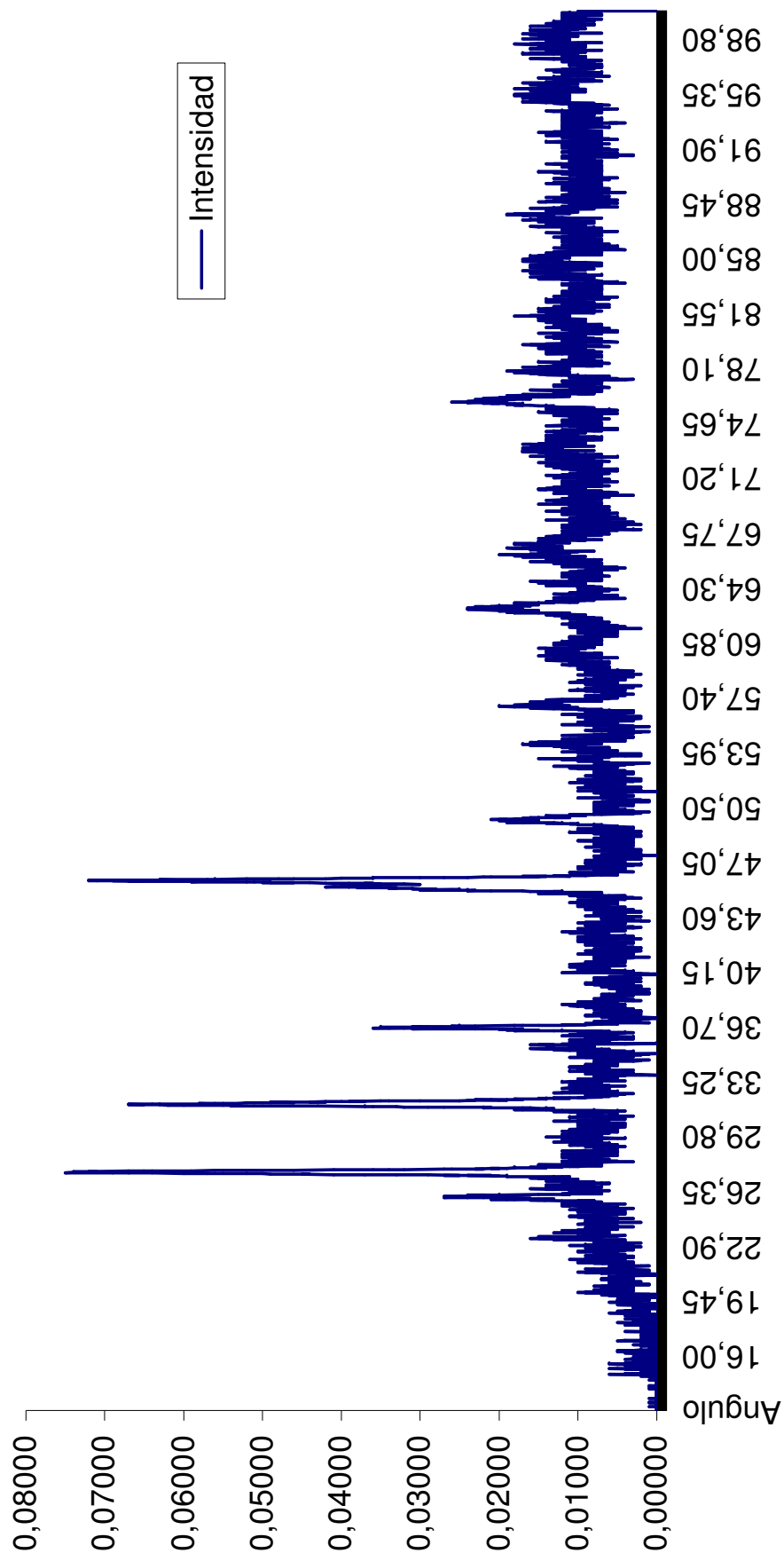


Figura 33. Espectro de respuesta en intensidad a diferentes ángulos de la arena artificial ante la exposición a los rayos x de la prueba de difracción.

Gráfico realizado en
Microsoft Excell® 2003

Prueba de resistencia a la compresión de un mortero hidráulico

Para determinar la resistencia a la compresión de las mezclas de mortero, se prepararon varias cantidades de arena, variando los porcentajes de sustitución de arena artificial en 0%, 10%, 20%, 50%, 70% y 100%, para un total de 6 muestras diferentes. La preparación de todos los morteros se realizó bajo las mismas condiciones, se mantuvo la misma relación agua/cemento y lo único que se varió fueron los porcentajes de arena artificial – natural que conformaban en su totalidad la arena para la producción de los morteros. Durante el desarrollo de todas las pruebas se hizo el máximo esfuerzo por mantener las mismas condiciones atmosféricas (temperatura, humedad), para así obtener la máxima fidelidad posible en los resultados.

La proporción utilizada fue de 1:3 (proporción por peso), la cual es una de las más comunes en el caso de los morteros de repello para paredes.

Las muestras fueron preparadas en pares durante tres días, para asegurar que todas hubiesen tenido similares condiciones de horario en su producción. A cada una de ellas se le realizó una prueba de flujo para poder así correlacionar estos valores más adelante de acuerdo con los porcentajes de sustitución de arena artificial, y su influencia en la resistencia a la compresión que obtuviesen estas muestras.

El Cuadro 14 resume las condiciones bajo las cuales fueron preparadas las muestras de acuerdo con cada porcentaje.

CUADRO 14. DATOS Y COMPOSICIÓN DE LAS MUESTRAS DE MORTERO.

Muestra	% AA	Agua (ml)	Arena Artificial (g)	Arena Natural (g)	Cem (g)
M6	0%	757,5	0	2812,5	937.5
M1	10%	757,5	281,25	2531,25	937.5
M2	20%	757,5	562,5	2250	937.5
M3	50%	757,5	1406,25	1406,25	937.5
M4	70%	757,5	1968,75	843,75	937.5
M5	100%	757,5	2812,5	0	937.5

Tabla realizada en
Microsoft Excell® 2003

Mortero con 0% de sustitución de arena artificial (M6)

Esta muestra (muestra patrón) fue realizada el día 1 de octubre de 2007, a las 16:20 horas. El Cuadro 15 muestra las condiciones bajo las cuales se realizó este ensayo:

CUADRO 15. CONDICIONES EXPERIMENTALES PARA LA PREPARACIÓN DEL MORTERO M6.		
Descripción	Valor	Unidad
Porcentaje de sustitución:	0%	-
Relación agua/cemento:	0,81	-
Agua:	757,5	ml
Temperatura:	30	°C
Humedad Relativa:	51%	-
Cemento:	Portland Tipo I	-
Proporción:	1:3	-

Tabla realizada en Microsoft Excell® 2003

Inmediatamente después de terminar la mezcla de mortero, se le realiza a la misma una prueba de flujo. En el Cuadro 16 se pueden observar los resultados de dicha prueba.

CUADRO 16. PRUEBA DE FLUJO PARA EL MORTERO M6.				
Prueba N°	Lectura inicial (mm)	Lectura final (mm)	Flujo (%)	Flujo promedio (%)
1	101,6	220,6	117,1%	
2	101,6	222,0	118,5%	
3	101,6	221,7	118,2%	
4	101,6	223,0	119,5%	118,3%

Tabla realizada en Microsoft Excell® 2003

Terminada esta etapa de la prueba se procede a la preparación de los cubos de mortero. Una vez terminados estos, son almacenados en una cámara húmeda, e irán siendo examinados de acuerdo con la edad requerida. Los resultados finales de los ensayos a compresión de los cubos de mortero al 0% de arena artificial se presentan a continuación en el Cuadro 17.

CUADRO 17. RESISTENCIA PROMEDIO A LA COMPRESIÓN DE UN MORTERO HIDRÁULICO CON UN 0% DE SUSTITUCIÓN DE ARENA ARTIFICIAL A DIFERENTES EDADES.								
Fecha del ensayo	N° Muestra	Edad (días)	Factor k (adim)	Carga V (kg)	Carga C (corregida, k*V) (kg)	Carga (N)	Resistencia (MPa)	Resistencia Promedio (Mpa)
04-oct	6-1	3	1,0549	1040	1097,10	10758,12	4,168	
04-oct	6-2	3	1,0549	1050	1107,65	10861,57	4,208	4,202
04-oct	6-3	3	1,0549	1055	1112,92	10913,29	4,228	
08-oct	6-4	7	1,0549	1940	2046,51	20068,04	7,775	
08-oct	6-5	7	1,0549	1990	2099,25	20585,26	7,976	7,688
08-oct	6-6	7	1,0549	1825	1925,19	18878,44	7,314	
15-oct	6-7	14	1,0549	2675	2821,86	27671,13	10,721	
15-oct	6-8	14	1,0549	2580	2721,64	26688,42	10,340	10,735
15-oct	6-9	14	1,0667	2750	2933,43	28765,17	11,145	
29-oct	6-10	28	1,0667	3300	3520,11	34518,20	13,374	
29-oct	6-11	28	1,0667	3225	3440,11	33733,69	13,070	13,577
29-oct	6-12	28	1,0667	3525	3760,12	36871,71	14,286	

Con estos valores es posible graficar la curva de resistencia del mortero a diferentes edades. La Figura 34 muestra la curva de resistencia,

además de la línea de mejor ajuste obtenida por el método de regresión de asociación exponencial.

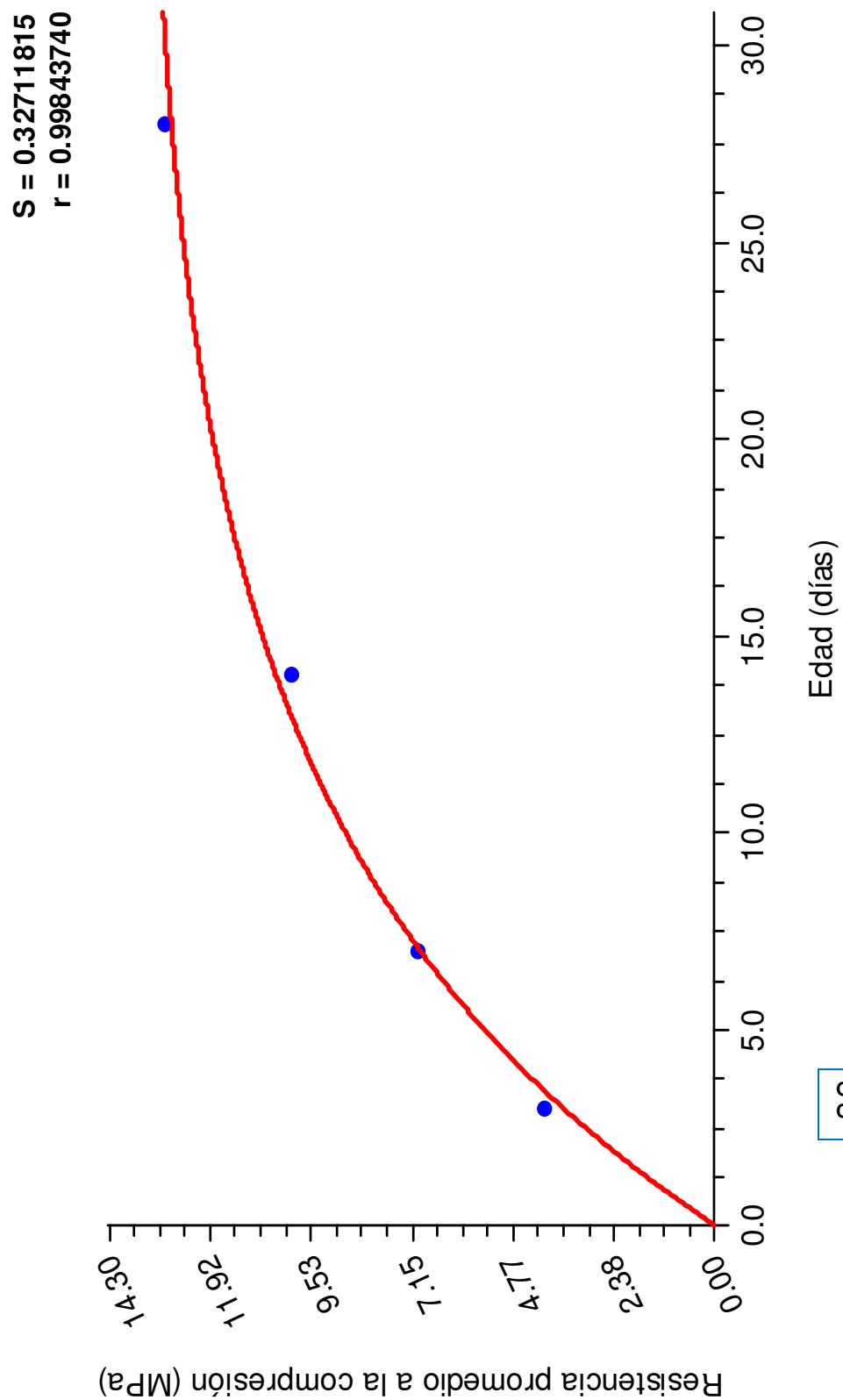


Gráfico realizado en
Curve Expert 5.1®

Figura 34. Curva de resistencia promedio a la compresión de un mortero hidráulico con un 0% de adición de arena artificial a diferentes edades.

Mortero con 10% de sustitución de arena artificial (M1)

Esta muestra fue realizada el día 26 de septiembre de 2007, a las 10:00 horas. El Cuadro 18 muestra las condiciones bajo las cuales se realizó este ensayo:

CUADRO 18. CONDICIONES EXPERIMENTALES PARA LA PREPARACIÓN DEL MORTERO M1.		
Descripción	Valor	Unidad
Porcentaje de sustitución:	10%	-
Relación agua/cemento:	0,81	-
Agua:	757,5	ml
Temperatura:	30	°C
Humedad Relativa:	52%	-
Cemento:	Portland Tipo I	-
Proporción:	1:3	-

Tabla realizada en Microsoft Excel® 2003

En el Cuadro 19 se muestran los resultados de la prueba de flujo realizada al mortero.

CUADRO 19. PRUEBA DE FLUJO PARA EL MORTERO M1.				
Prueba N°	Lectura inicial (mm)	Lectura final (mm)	Flujo (%)	Flujo promedio (%)
1	101,6	224,4	120,9%	
2	101,6	221,5	118,0%	
3	101,6	222,0	118,5%	
4	101,6	222,0	118,5%	119,0%

Tabla realizada en Microsoft Excel® 2003

Los resultados finales de los ensayos a compresión de los cubos de mortero al 10% de sustitución de arena artificial se presentan en el Cuadro 20.

CUADRO 20. RESISTENCIA PROMEDIO A LA COMPRESIÓN DE UN MORTERO HIDRÁULICO CON UN 10% DE ADICIÓN DE ARENA ARTIFICIAL A DIFERENTES EDADES.								
Fecha del ensayo	N° Muestra	Edad (días)	Factor k (adim)	Carga V (kg)	Carga C (corregida, k*V) (kg)	Carga (N)	Resistencia (MPa)	Resistencia Promedio (Mpa)
28-sep	1-1	2	1,0549	625	659,31	6465,22	2,505	
28-sep	1-2	2	1,0549	670	706,78	6930,71	2,685	2,525
28-sep	1-3	2	1,0549	595	627,67	6154,89	2,385	
31-sep	1-4	7	1,0549	1425	1503,23	14740,70	5,711	
31-sep	1-5	7	1,0549	1440	1519,06	14895,86	5,771	5,758
31-sep	1-6	7	1,0549	1445	1524,33	14947,58	5,791	
08-oct	1-7	14	1,0549	2260	2384,07	23378,23	9,058	
08-oct	1-8	14	1,0549	2390	2521,21	24723,00	9,579	9,398
08-oct	1-9	14	1,0549	2385	2515,94	24671,27	9,559	
22-oct	1-10	28	1,0667	3400	3626,78	35564,20	13,779	
22-oct	1-11	28	1,0667	3300	3520,11	34518,20	13,374	13,779
22-oct	1-12	28	1,0667	3500	3733,45	36610,21	14,185	

Tabla realizada en Microsoft Excel® 2003

La Figura 35 muestra la curva de resistencia, además de la línea de mejor ajuste respectiva del

mortero con un 10% de sustitución de arena artificial.

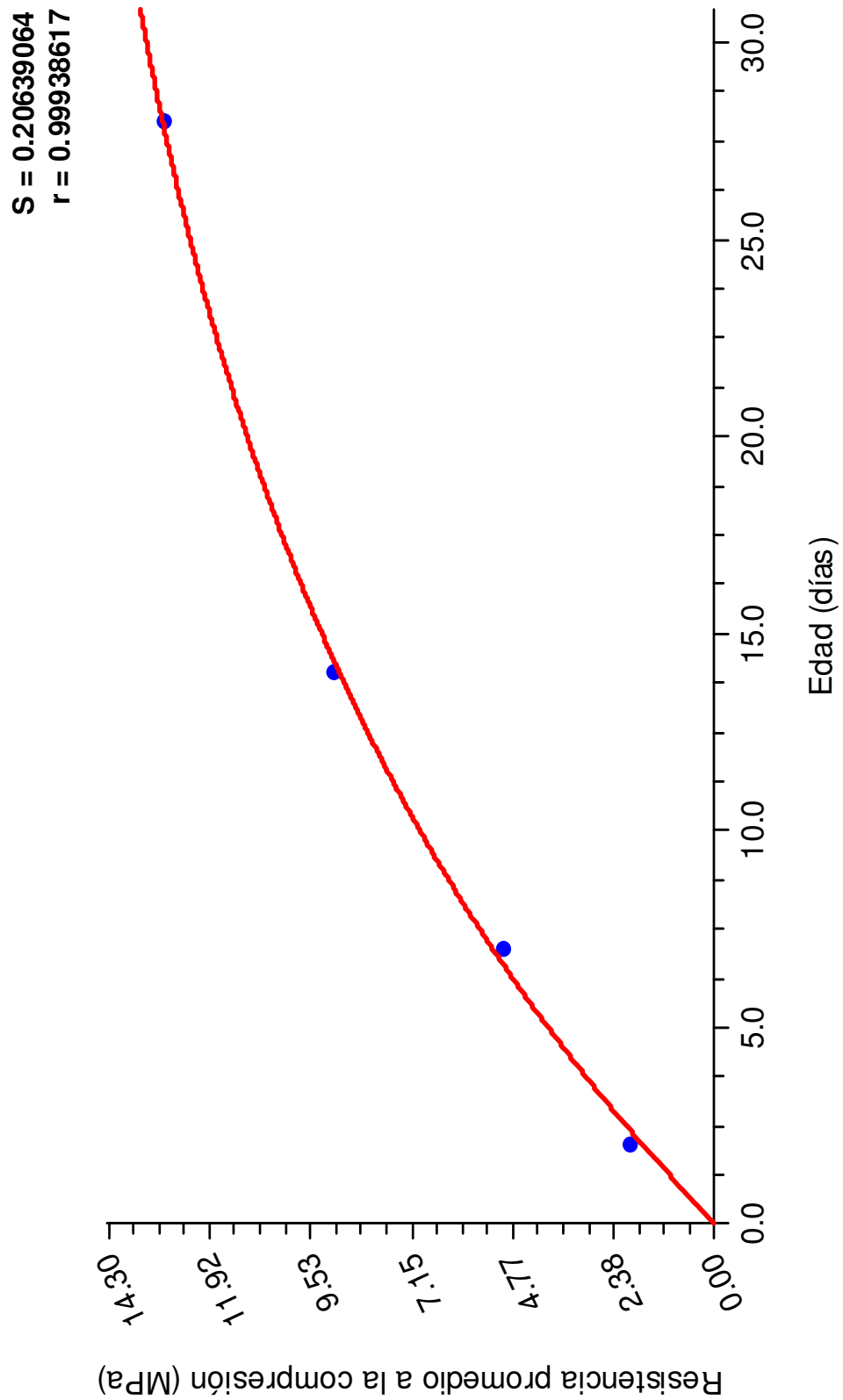


Figura 35. Curva de resistencia promedio a la compresión de un mortero hidráulico con un 10% de adición de arena artificial a diferentes edades.

Gráfico realizado en
Curve Expert 5.1®

Mortero con 20% de sustitución de arena artificial (M2)

Esta muestra fue realizada el día 26 de septiembre de 2007, a las 13:00 horas. En el Cuadro 21 se pueden apreciar las condiciones bajo las cuales se realizó este ensayo:

CUADRO 21. CONDICIONES EXPERIMENTALES PARA LA PREPARACIÓN DEL MORTERO M2.		
Descripción	Valor	Unidad
Porcentaje de sustitución:	20%	-
Relación agua/cemento:	0,81	-
Agua:	757,5	ml
Temperatura:	32	°C
Humedad Relativa:	50%	-
Cemento:	Portland Tipo I	-
Proporción:	1:3	-

Tabla realizada en Microsoft Excell® 2003

En el Cuadro 22 se pueden observar los resultados de la prueba de flujo realizada al mortero, una vez concluida la preparación de este.

CUADRO 22. PRUEBA DE FLUJO PARA EL MORTERO M2.				
Prueba N°	Lectura inicial (mm)	Lectura final (mm)	Flujo (%)	Flujo promedio (%)
1	101,6	226,4	122,8%	
2	101,6	219,2	115,7%	
3	101,6	215,5	112,1%	
4	101,6	222,3	118,8%	117,4%

Tabla realizada en Microsoft Excell® 2003

Los resultados finales de los ensayos a compresión de los cubos de mortero al 20% de sustitución de arena artificial son resumidos en el Cuadro 23.

CUADRO 23. RESISTENCIA PROMEDIO A LA COMPRESIÓN DE UN MORTERO HIDRÁULICO CON UN 20% DE ADICIÓN DE ARENA ARTIFICIAL A DIFERENTES EDADES.								
Fecha del ensayo	N° Muestra	Edad (días)	Factor k (adim)	Carga V (kg)	Carga C (corregida, k*V) (kg)	Carga (N)	Resistencia (MPa)	Resistencia Promedio (Mpa)
28-sep	2-1	2	1,0549	575	606,57	5948,00	2,305	
28-sep	2-2	2	1,0549	565	596,02	5844,56	2,264	2,284
28-sep	2-3	2	1,0549	570	601,29	5896,28	2,284	
31-sep	2-4	7	1,0549	1510	1592,90	15619,97	6,052	
31-sep	2-5	7	1,0549	1500	1582,35	15516,52	6,012	6,012
31-sep	2-6	7	1,0549	1490	1571,80	15413,08	5,972	
08-oct	2-7	14	1,0549	2485	2621,43	25705,71	9,960	
08-oct	2-8	14	1,0549	2405	2537,03	24878,16	9,639	9,672
08-oct	2-9	14	1,0549	2350	2479,02	24309,22	9,419	
22-oct	2-10	28	1,0667	3525	3760,12	36871,71	14,286	
22-oct	2-11	28	1,0667	3275	3493,44	34256,70	13,273	13,610
22-oct	2-12	28	1,0667	3275	3493,44	34256,70	13,273	

Tabla realizada en Microsoft Excell® 2003

Con estos datos se procede a trazar la curva de resistencia, además de la línea de mejor ajuste por el método de regresión de asociación exponencial. La Figura 36 ilustra lo anterior.

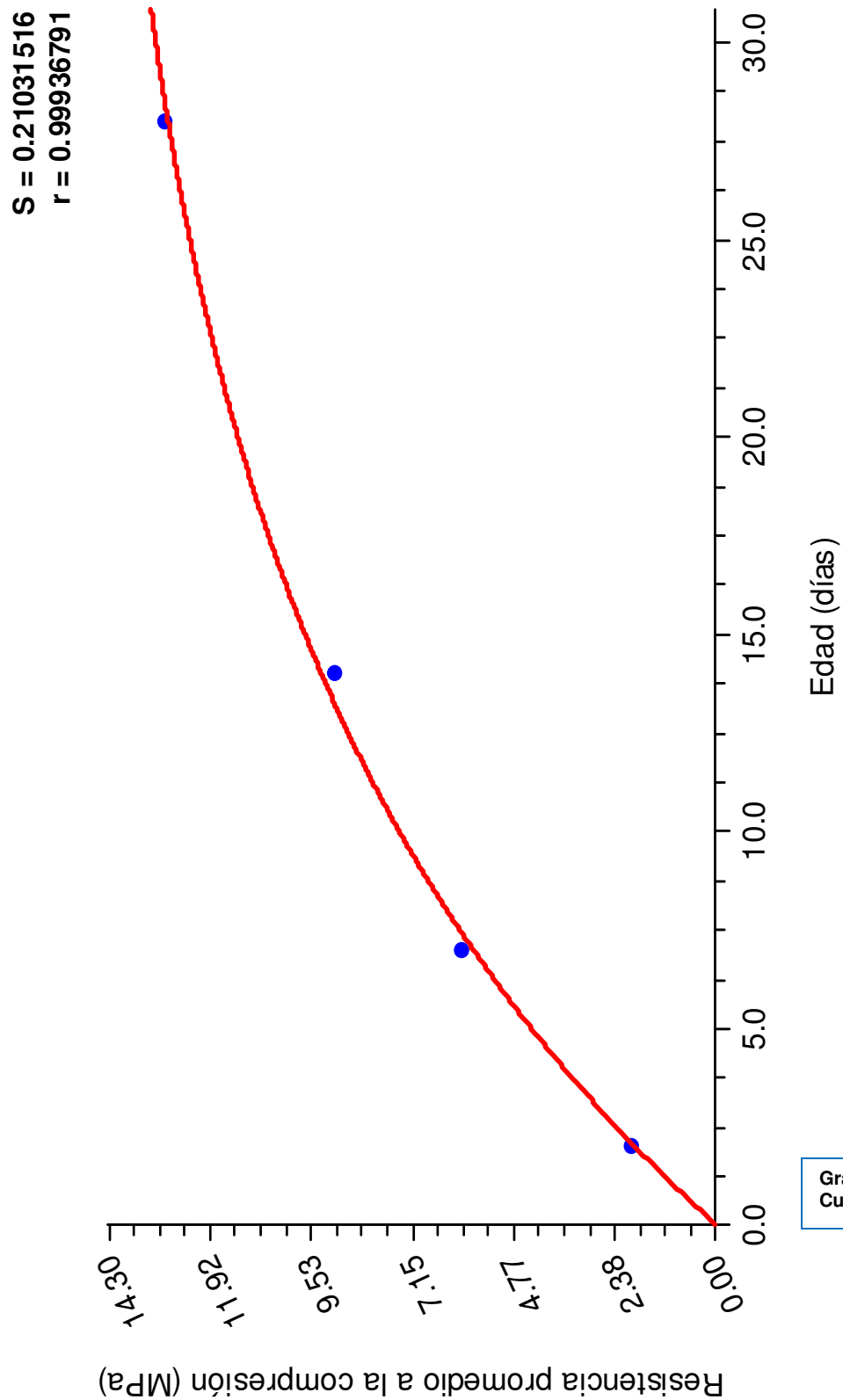


Figura 36. Curva de resistencia promedio a la compresión de un mortero hidráulico con un 20% de adición de arena artificial a diferentes edades.

Gráfico realizado en
Curve Expert 5.1®

Mortero con 50% de sustitución de arena artificial (M3)

Esta muestra fue realizada el día 28 de septiembre de 2007, a las 11:30 horas. En el Cuadro 24 se muestran las condiciones bajo las que se realizó el ensayo:

CUADRO 24. CONDICIONES EXPERIMENTALES PARA LA PREPARACIÓN DEL MORTERO M3.		
Descripción	Valor	Unidad
Porcentaje de sustitución:	50%	-
Relación agua/cemento:	0,81	-
Agua:	757,5	ml
Temperatura:	29	°C
Humedad Relativa:	53%	-
Cemento:	Portland Tipo I	-
Proporción:	1:3	-

Tabla realizada en Microsoft Excell® 2003

En el Cuadro 25 se muestran los resultados de la prueba de flujo efectuada al mortero, una vez concluida la preparación de este.

CUADRO 25. PRUEBA DE FLUJO PARA EL MORTERO M3.				
Prueba Nº	Lectura inicial (mm)	Lectura final (mm)	Flujo (%)	Flujo promedio (%)
1	101,6	220,0	116,5%	
2	101,6	215,4	112,0%	
3	101,6	224,0	120,5%	
4	101,6	216,5	113,1%	115,5%

Tabla realizada en Microsoft Excell® 2003

El ensayo de compresión de los cubos de mortero al 50% de sustitución de arena artificial obtuvo los siguientes resultados, que se resumen en el Cuadro 26.

CUADRO 26. RESISTENCIA PROMEDIO A LA COMPRESIÓN DE UN MORTERO HIDRÁULICO CON UN 50% DE ADICIÓN DE ARENA ARTIFICIAL A DIFERENTES EDADES.								
Fecha del ensayo	Nº Muestra	Edad (días)	Factor k (adim)	Carga V (kg)	Carga C (corregida, k*V) (kg)	Carga (N)	Resistencia (MPa)	Resistencia Promedio (Mpa)
01-oct	3-1	3	1,0549	1205	1271,15	12464,94	4,830	
01-oct	3-2	3	1,0549	1050	1107,65	10861,57	4,208	4,562
01-oct	3-3	3	1,0549	1160	1223,68	11999,45	4,649	
04-oct	3-4	7	1,0549	1780	1877,72	18412,94	7,134	
04-oct	3-5	7	1,0549	1775	1872,45	18361,22	7,114	6,900
04-oct	3-6	7	1,0549	1610	1698,39	16654,40	6,453	
11-oct	3-7	14	1,0549	2500	2637,25	25860,87	10,020	
11-oct	3-8	14	1,0549	2425	2558,13	25085,05	9,719	10,295
11-oct	3-9	14	1,0667	2750	2933,43	28765,17	11,145	
25-oct	3-10	28	1,0667	3150	3360,11	32949,19	12,766	
25-oct	3-11	28	1,0667	3075	3280,10	32164,69	12,462	12,766
25-oct	3-12	28	1,0667	3225	3440,11	33733,69	13,070	

Tabla realizada en Microsoft Excell® 2003

La Figura 37 muestra la gráfica de resistencia del mortero, obtenida a partir de los datos anteriores.

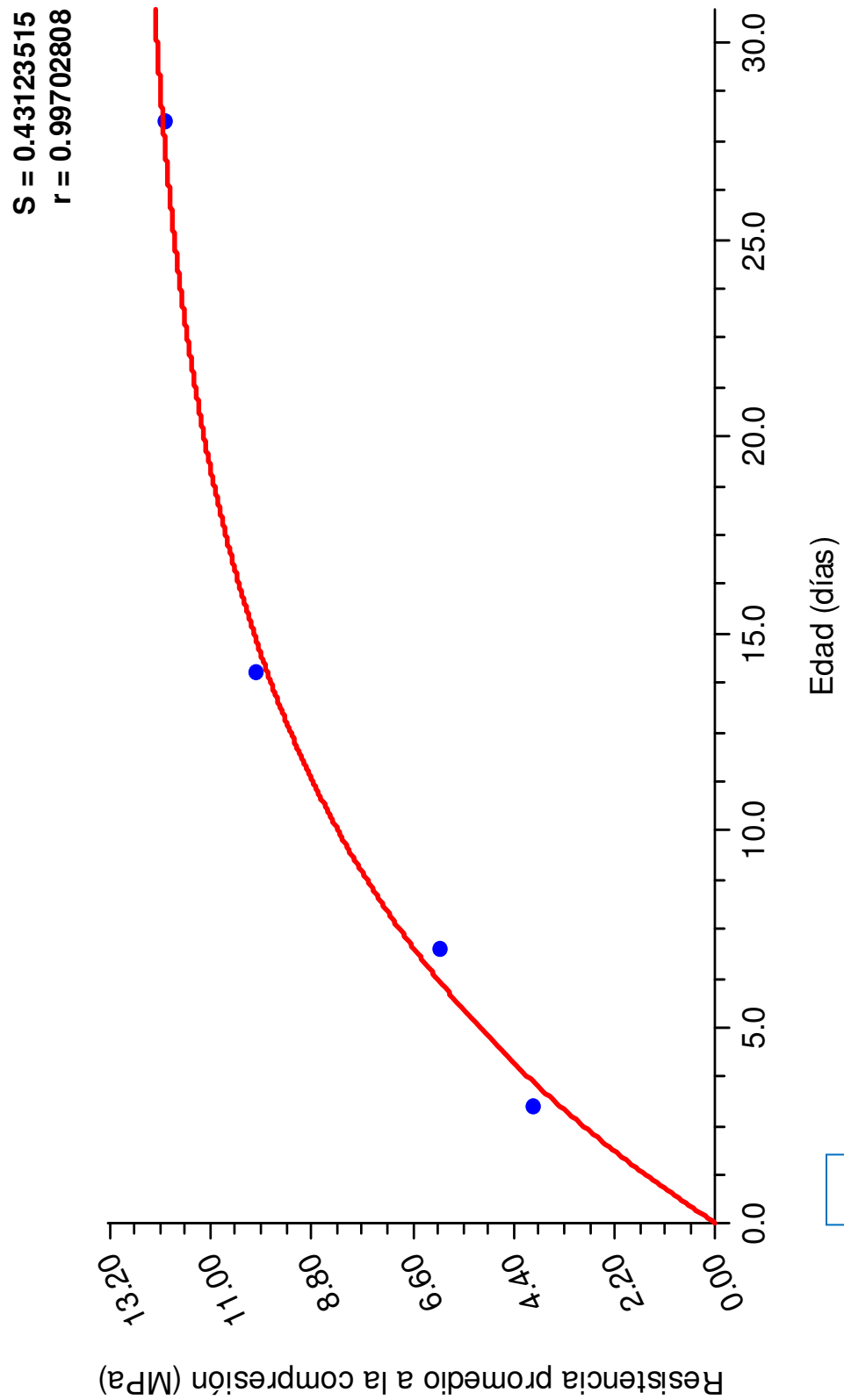


Figura 37. Curva de resistencia promedio a la compresión de un mortero hidráulico con un 50% de adición de arena artificial a diferentes edades.

Gráfico realizado en
Curve Expert 5.1®

Mortero con 70% de sustitución de arena artificial (M4)

Esta muestra fue realizada el día 28 de septiembre de 2007, a las 13:00 horas. En el Cuadro 27 se muestran las condiciones bajo las cuales se produjo este ensayo:

CUADRO 27. CONDICIONES EXPERIMENTALES PARA LA PREPARACIÓN DEL MORTERO M4.		
Descripción	Valor	Unidad
Porcentaje de sustitución:	70%	-
Relación agua/cemento:	0,81	-
Agua:	757,5	ml
Temperatura:	29	°C
Humedad Relativa:	51%	-
Cemento:	Portland Tipo I	-
Proporción:	1:3	-

Tabla realizada en Microsoft Excell® 2003

En el Cuadro 28 es posible observar los resultados de la prueba de flujo efectuada a la pasta de mortero, inmediatamente después de concluida su preparación.

CUADRO 28. PRUEBA DE FLUJO PARA EL MORTERO M4.				
Prueba N°	Lectura inicial (mm)	Lectura final (mm)	Flujo (%)	Flujo promedio (%)
1	101,6	216,5	113,1%	
2	101,6	216,5	113,1%	
3	101,6	218,0	114,6%	
4	101,6	216,0	112,6%	113,3%

Tabla realizada en Microsoft Excell® 2003

Una vez obtenidos estos datos se procedió a realizar el ensayo de compresión a los cubos de mortero con un 70% de sustitución de arena artificial. Los resultados finales del mismo se muestran en el Cuadro 29.

CUADRO 29. RESISTENCIA PROMEDIO A LA COMPRESIÓN DE UN MORTERO HIDRÁULICO CON UN 70% DE ADICIÓN DE ARENA ARTIFICIAL A DIFERENTES EDADES.								
Fecha del ensayo	N° Muestra	Edad (días)	Factor k (adim)	Carga V (kg)	Carga C (corregida, k*V) (kg)	Carga (N)	Resistencia (MPa)	Resistencia Promedio (Mpa)
01-oct	4-1	3	1,0549	1020	1076,00	10551,24	4,088	
01-oct	4-2	3	1,0549	1190	1255,33	12309,78	4,769	4,315
01-oct	4-3	3	1,0549	1020	1076,00	10551,24	4,088	
04-oct	4-4	7	1,0549	1660	1751,13	17171,62	6,653	
04-oct	4-5	7	1,0549	1665	1756,41	17223,34	6,673	6,867
04-oct	4-6	7	1,0549	1815	1914,64	18774,99	7,274	
11-oct	4-7	14	1,0549	2500	2637,25	25860,87	10,020	
11-oct	4-8	14	1,0549	2450	2584,51	25343,66	9,819	9,819
11-oct	4-9	14	1,0549	2400	2531,76	24826,44	9,619	
25-oct	4-10	28	1,0667	3275	3493,44	34256,70	13,273	
25-oct	4-11	28	1,0667	3425	3653,45	35825,71	13,881	13,138
25-oct	4-12	28	1,0667	3025	3226,77	31641,68	12,259	

Tabla realizada en Microsoft Excell® 2003

En la Figura 38 se puede observar la curva de resistencia del mortero y su línea de mejor ajuste.

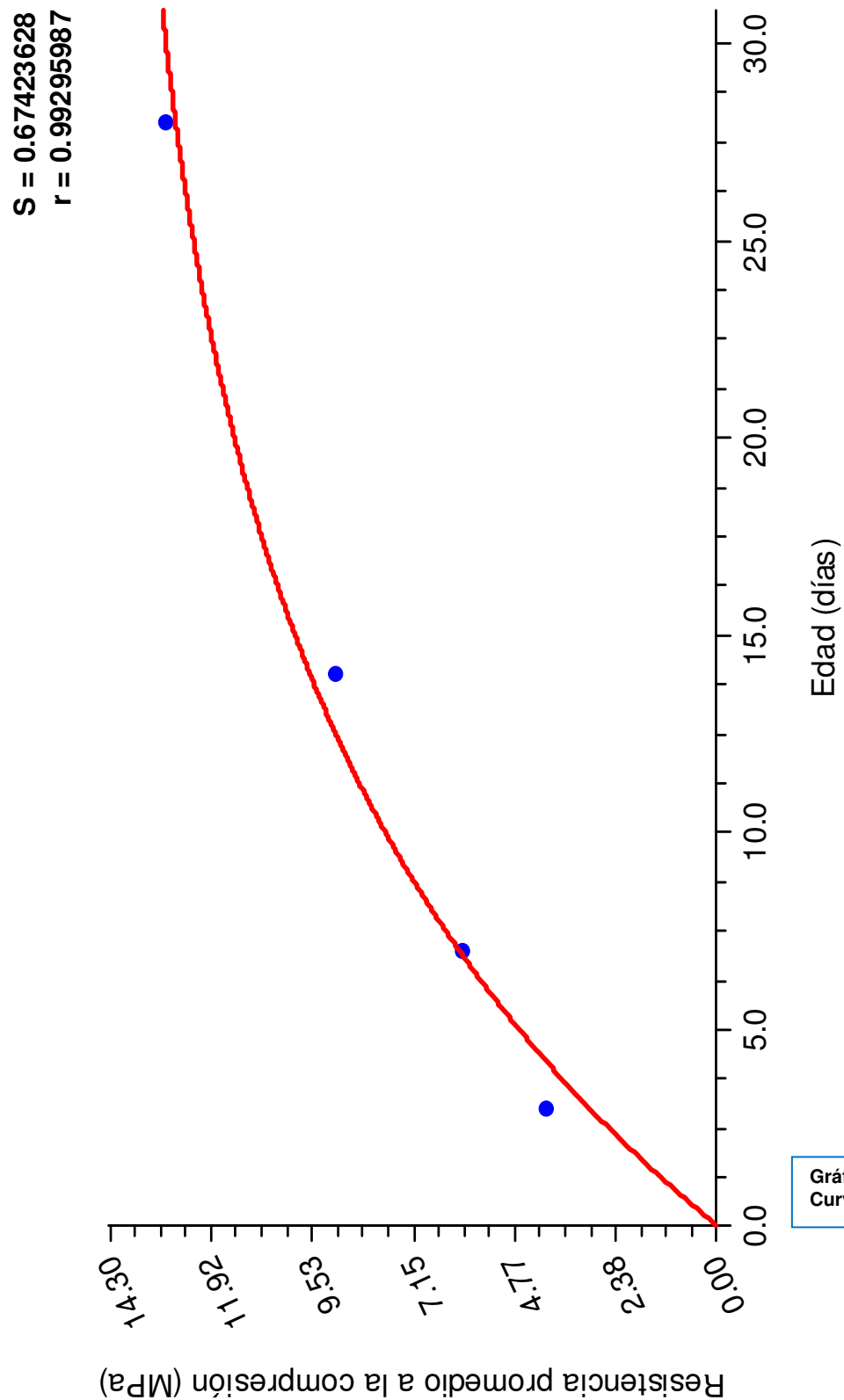


Figura 38. Curva de resistencia promedio a la compresión de un mortero hidráulico con un 70% de adición de arena artificial a diferentes edades.

Mortero con 100% de sustitución de arena artificial (M5)

Esta muestra fue realizada el día 1 de octubre de 2007, a las 15:30 horas. En el Cuadro 30 se pueden observar las condiciones experimentales en las que se produjo el experimento:

CUADRO 30. CONDICIONES EXPERIMENTALES PARA LA PREPARACIÓN DEL MORTERO M5.		
Descripción	Valor	Unidad
Porcentaje de sustitución:	100%	-
Relación agua/cemento:	0,81	-
Agua:	757,5	ml
Temperatura:	30	°C
Humedad Relativa:	51%	-
Cemento:	Portland Tipo I	-
Proporción:	1:3	-

Tabla realizada en Microsoft Excell® 2003

Los resultados de la prueba de Flujo realizada a la pasta de mortero se muestran en el Cuadro 31.

CUADRO 31. PRUEBA DE FLUJO PARA EL MORTERO M5.				
Prueba Nº	Lectura inicial (mm)	Lectura final (mm)	Flujo (%)	Flujo promedio (%)
1	101,6	189,0	86,0%	
2	101,6	189,0	86,0%	
3	101,6	186,0	83,1%	
4	101,6	190,0	87,0%	85,5%

Tabla realizada en Microsoft Excell® 2003

Los resultados finales de la prueba de resistencia a la compresión del mortero hidráulico con un 100% de sustitución de arena artificial se muestran en el Cuadro 32.

CUADRO 32. RESISTENCIA PROMEDIO A LA COMPRESIÓN DE UN MORTERO HIDRÁULICO CON UN 100% DE ADICIÓN DE ARENA ARTIFICIAL A DIFERENTES EDADES.								
Fecha del ensayo	Nº Muestra	Edad (días)	Factor k (adim)	Carga V (kg)	Carga C (corregida, k*V) (kg)	Carga (N)	Resistencia (MPa)	Resistencia Promedio (Mpa)
04-oct	5-1	3	1,0549	1055	1112,92	10913,29	4,228	
04-oct	5-2	3	1,0549	1270	1339,72	13137,32	5,090	4,642
04-oct	5-3	3	1,0549	1150	1213,14	11896,00	4,609	
08-oct	5-4	7	1,0549	1570	1656,19	16240,63	6,292	
08-oct	5-5	7	1,0549	1605	1693,11	16602,68	6,433	6,493
08-oct	5-6	7	1,0549	1685	1777,51	17430,23	6,753	
15-oct	5-7	14	1,0549	2190	2310,23	22654,13	8,777	
15-oct	5-8	14	1,0549	1945	2051,78	20119,76	7,795	8,316
15-oct	5-9	14	1,0549	2090	2204,74	21619,69	8,376	
29-oct	5-10	28	1,0549	2550	2690,00	26378,09	10,220	
29-oct	5-11	28	1,0549	2575	2716,37	26636,70	10,320	10,320
29-oct	5-12	28	1,0549	2600	2742,74	26895,31	10,420	

Tabla realizada en Microsoft Excell® 2003

En la Figura 39 se muestra la curva de resistencia del mortero con un 100% de sustitución de arena artificial y se ha trazado la línea de mejor ajuste entre estos puntos.

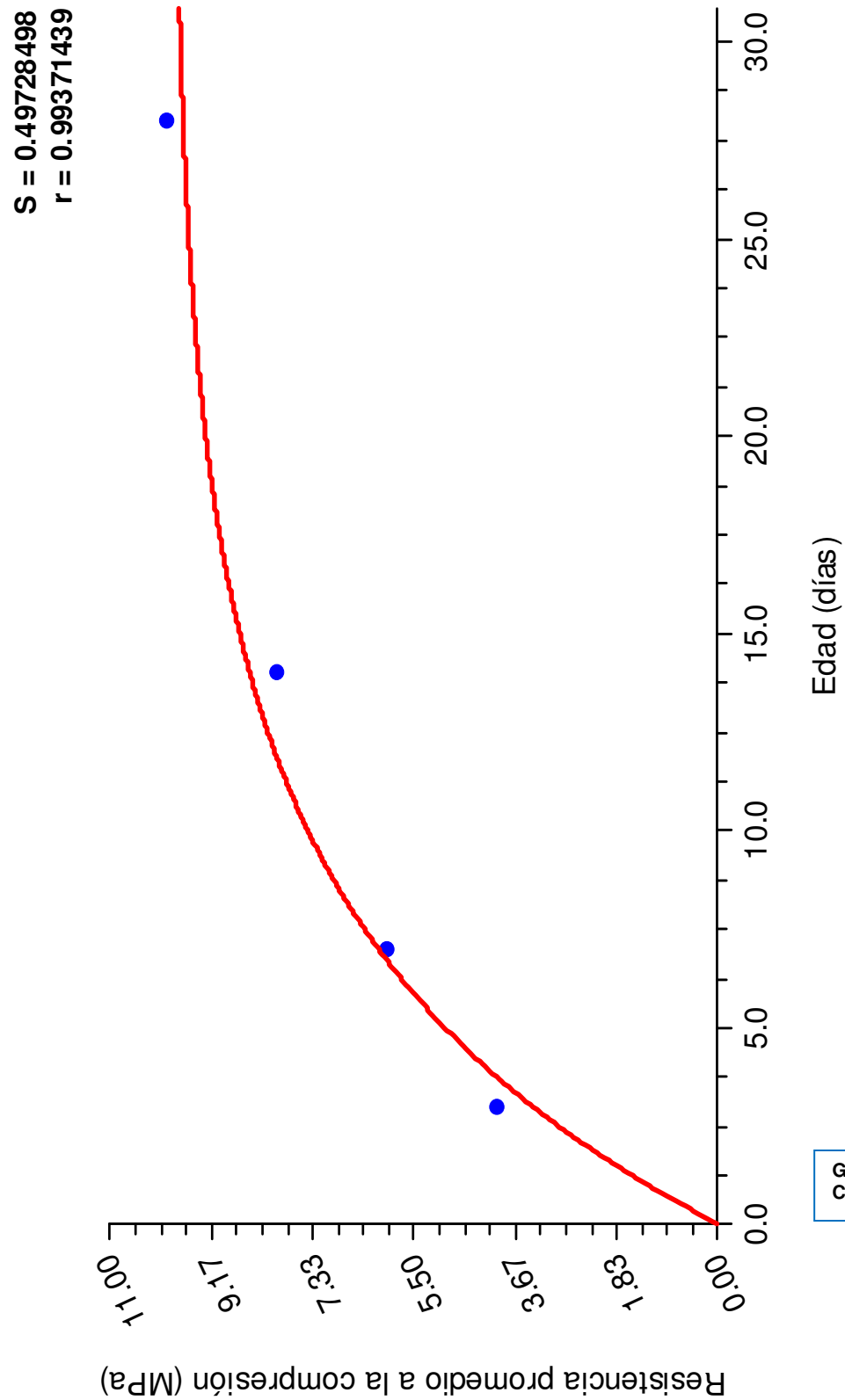


Figura 39. Curva de resistencia promedio a la compresión de un mortero hidráulico con un 100% de adición de arena artificial a diferentes edades.

Gráfico realizado en
Curve Expert 5.1®

Compilación de los resultados

una de las mezclas de mortero y sus respectivos porcentajes de sustitución de arena artificial.

En el Cuadro 33 se muestra un resumen de los resultados obtenidos de la resistencia para cada

CUADRO 33. RESISTENCIA PROMEDIO A LA COMPRESIÓN PARA MEZCLAS DE MORTERO HIDRÁULICO CON DISTINTOS PORCENTAJES DE SUSTITUCIÓN DE ARENA ARTIFICIAL A VARIAS EDADES.

Muestra	Porcentaje de Arena Artificial	Edad (días)	Resistencia promedio a la compresión (Mpa)
M6	0%	0	0,000
		3	4,202
		7	7,688
		14	10,735
		28	13,577
M1	10%	0	0,000
		2	2,525
		7	5,758
		14	9,398
		28	13,779
M2	20%	0	0,000
		2	2,284
		7	6,012
		14	9,672
		28	13,610
M3	50%	0	0,000
		3	4,562
		7	6,900
		14	10,295
		28	12,766
M4	70%	0	0,000
		3	4,315
		7	6,867
		14	9,819
		28	13,138
M5	100%	0	0,000
		3	4,642
		7	6,493
		14	8,316
		28	10,320

Compilando todas las curvas de resistencia en una sola gráfica, es posible determinar mejor el comportamiento de la resistencia de las diferentes mezclas de mortero con respecto a la

Tabla realizada en Microsoft Excel® 2003
edad de las mismas y el porcentaje de sustitución de arena artificial que éstas posean. Se puede observar en la Figura 40 lo anteriormente descrito.

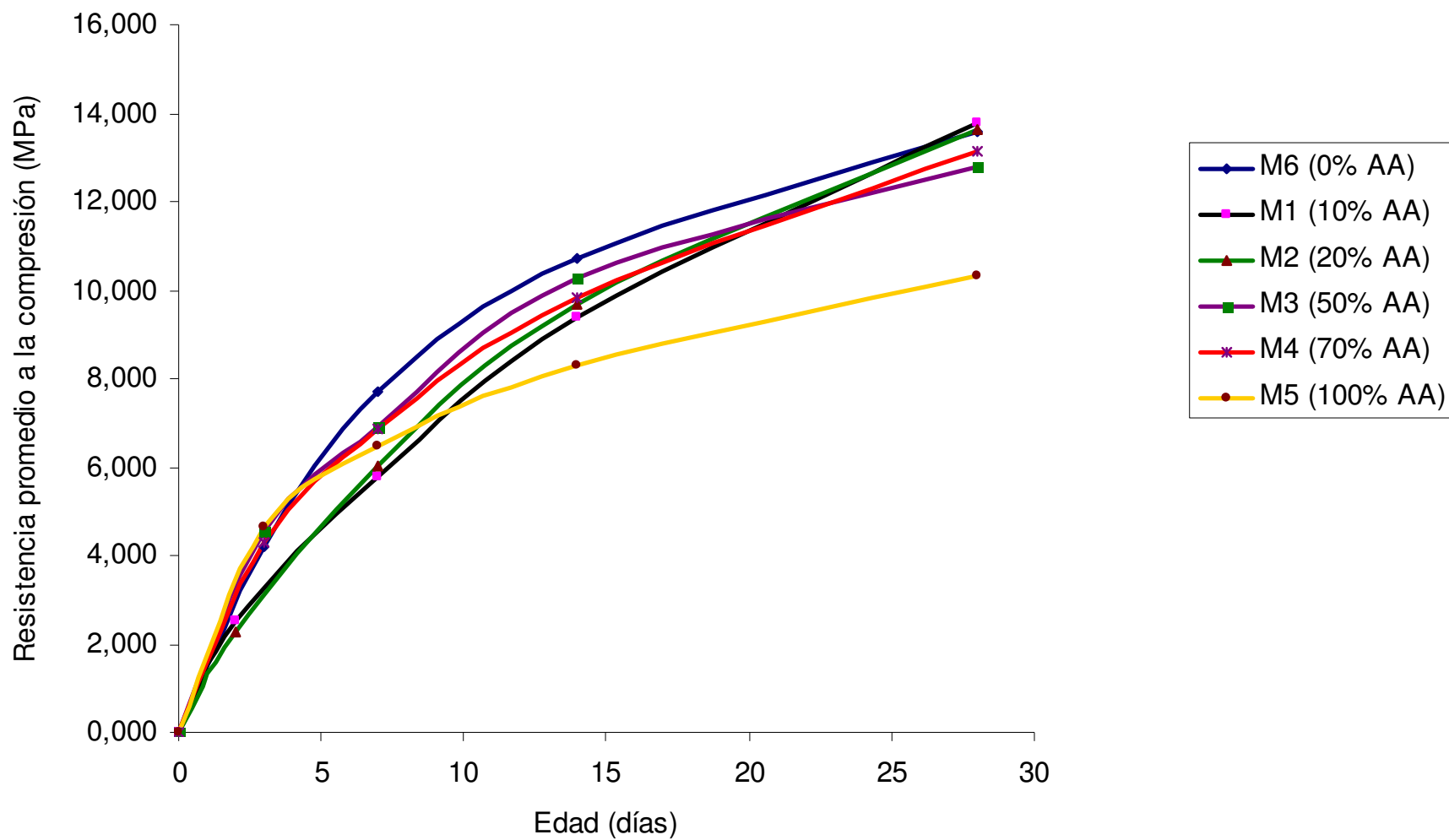


Figura 40. Curvas de resistencia promedio a la compresión de morteros hidráulicos con diferentes porcentajes de adición de arena artificial a distintas edades.

Gráfico realizado en
Microsoft Excel 2003®

En la Figura 41 se muestra la gráfica de variación de la resistencia a una misma edad, para los

diferentes porcentajes de sustitución de arena artificial en la mezcla de mortero.

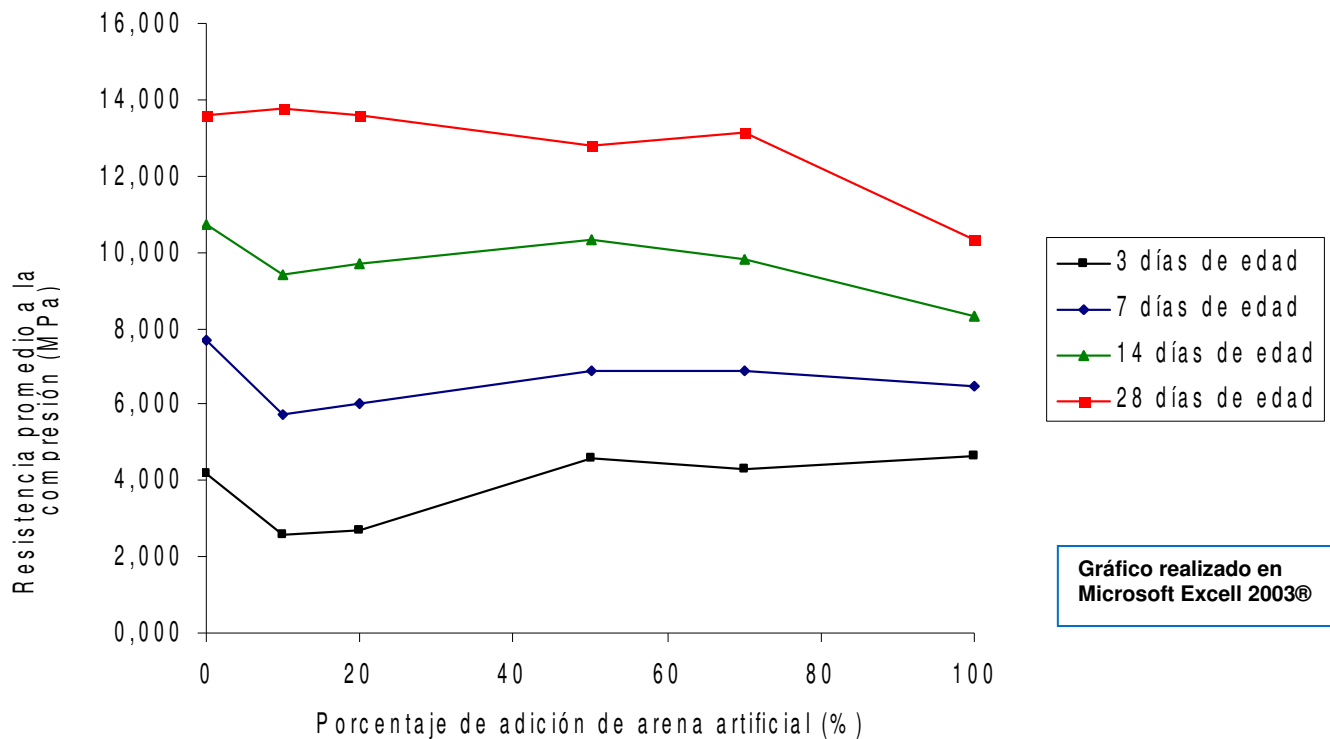


Figura 41. Variación de la resistencia de las mezclas de mortero a las mismas edades con diferentes porcentajes de sustitución de material artificial.

De igual forma, en la Figura 42 es posible observar la tendencia del flujo de la muestra de

mortero de acuerdo con la cantidad de arena artificial que se agregó a la mezcla.

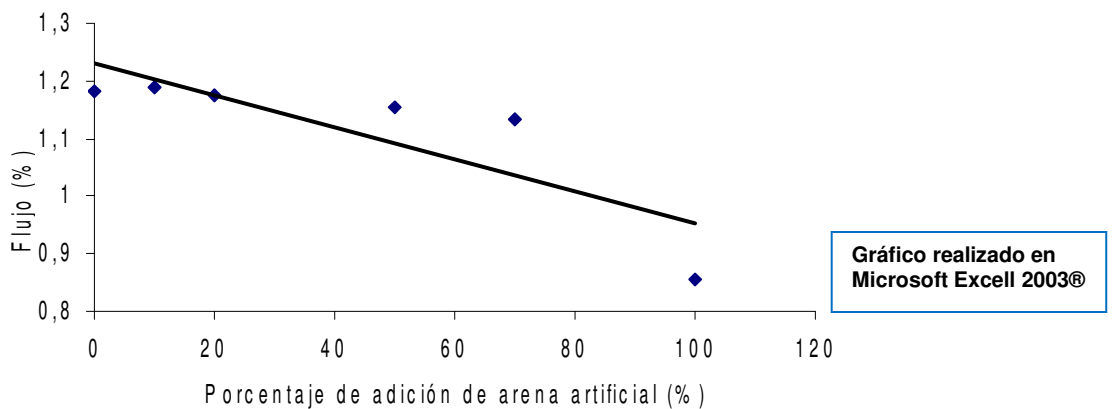


Figura 42. Variación del flujo de acuerdo con el porcentaje de sustitución de arena artificial.

Prueba práctica de campo

Con el fin de poder establecer ciertos parámetros de comportamiento del material en una obra civil, se procedió a realizar una prueba práctica de campo con dicho material.

De acuerdo con los resultados obtenidos para la resistencia de las muestras a diferentes porcentajes y su trabajabilidad al momento de moldearlas, se decide seleccionar la mezcla de mortero que contiene un porcentaje de un **50% de arena artificial** de la cantidad total de arena de la mezcla.

Se prepararon dos paños de mortero de repello, uno para una habitación interior y otro para un muro externo de una obra civil. La Figura 43 muestra el momento en el que la arena artificial es “cernida” (tamizada) mediante un “cedazo mosquitero” práctica usual en el campo para poder obtener el diámetro de partícula necesario para el mortero.



Figura 43. Tamizado de la arena artificial en campo.

En la Figura 44 es posible observar la consistencia de la mezcla de mortero, lista para ser usada en los diferentes repellos de los muros. Dicha consistencia era prácticamente la misma que la de un mortero convencional. En la Figura 45 se presenta el paño de mortero en el interior de una habitación en una obra civil, mientras que en la Figura 46 se aprecia el paño de mortero de

repello utilizado para un muro exterior en la misma obra.



Figura 44. Mortero justo antes de ser aplicado como repello.



Figura 45. Paño de mortero de repello en habitación interior.



Figura 46. Paño de mortero de repello en muro exterior.

Comparación de costos de producción

Con el objetivo de poder tener una idea de cuánto más barato (o más costoso) puede ser la producción de la arena artificial en comparación con la arena natural, se realizó un pequeño estudio de los costos aproximados de producción,

por metro cúbico, de la arena natural. Los datos presentados son aproximaciones, basadas en la experiencia del Sr. Orlando Moya, quien ha trabajado durante muchos años en el campo de la extracción de agregados para la construcción, tanto en ríos como en tajos. En el Cuadro 34 se muestran dichos valores:

CUADRO 34. COSTO APROXIMADO POR METRO CÚBICO DE PRODUCCIÓN DE ARENA NATURAL.		
Etapas	Rubros	Costo aproximado por metro cúbico
TRAMITOLOGÍA	Garantía de cumplimiento	\$2
	Canon municipal (gasto por m ² en tajos y por metro lineal en causes)	
	Regente ambiental	
	Topógrafo (un informe cada 3 meses y uno anual)	
PROCESO	Extracción del material	\$2
	Acarreo al quebrador (Incluye zarandeado y cribado)	\$1
	Trituración (incluye desembone, carga y stock)	\$4
GASTOS ADMINISTRATIVOS	Contables	\$1,5
	Legales	
	Vigilancia	
	Secretaría, oficinas	
	TOTAL COSTO DE PRODUCCIÓN	\$10,5
	PRECIO EN EL MERCADO	\$12

Tabla realizada en Microsoft Excel® 2003

Estos resultados varían de acuerdo con el proceso al que haya que someter a la arena, por ejemplo, para el caso de algunos tajos, no se requiere tamizar el material para adecuar la granulometría, a las exigencias nacionales, además, en una gran mayoría de tajos no se necesita triturar más el material (en esta etapa se bifurcan los procesos para el agregado fino y grueso), la arena es extraída y el resto del material se pasa por el quebrador para obtener agregado grueso.

Para el caso de una eventual producción de la arena artificial, no se necesitaría pagar gastos de tramitología (canones municipales, regente ambiental, garantías, topógrafos, etc). Tampoco sería necesario el uso de maquinaria pesada para la extracción. Únicamente se necesita acarrear la materia prima (los precipitados sólidos residuales del proceso de tratamiento de desechos con tecnología de plasma) hasta la trituradora, Lo que generaría un ahorro de hasta \$4/m³. Así las cosas, el costo de producción de la arena artificial podría rondar los \$6,5/m³.

Análisis de los Resultados

Según los resultados obtenidos en la presente investigación, se puede observar lo siguiente:

Todos los ensayos fueron realizados bajo una modalidad práctica, es decir, su desarrollo se ejecutó en forma progresiva de acuerdo con el orden establecido en el apartado de metodología.

En todas las pruebas se contó con el apoyo de personal técnico calificado, quien brindó la asesoría necesaria para poder efectuar correctamente los procedimientos estipulados por las normas.

De acuerdo con los resultados de la **prueba de gravedad específica y absorción del agregado fino**, ambos materiales poseen un comportamiento muy similar, esto se evidencia tanto en los resultados de gravedad específica (2.44 y 2.48, según Cuadros 5 y 7, para la arena natural y la artificial respectivamente), como en la absorción (4.51% y 4.23%, según Cuadros 5 y 7).

De los datos anteriores se evidencia que la arena natural es ligeramente menos masiva que la artificial, es decir, es menos pesada la arena natural, además, la arena artificial absorbe menor cantidad de agua que la natural.

El resultado de gravedad específica masiva para ambas arenas tiene sentido, pues, como ya se indicó al inicio de la investigación, el material artificial proviene de un proceso de pulverización a partir de un precipitado sólido con un alto valor de densidad, producto de la solidificación de materiales que en su momento se encontraban en estado líquido y en un ambiente que no daba grandes posibilidades para la intromisión de aire o discontinuidades en su estructura, pues el proceso de tratamiento de los desechos con la tecnología de plasma se realiza bajo circunstancias sumamente controladas.

La absorción mayor del material natural se debe a que el mismo posee un mayor volumen de vacíos en su estructura, por lo cual le permite almacenar cantidades mayores de agua que el

material artificial, este, como ya se mencionó, es más denso al compararlo con el natural.

Las curvas granulométricas para ambos materiales también son similares; al compararlas en una misma gráfica, como se observa en la Figura 32, se evidencia que su comportamiento es regular y que la arena natural posee un valor de finos mayor al de la artificial, esta diferencia es producto también de los orígenes de ambas arenas; la arena natural es producto de un proceso de erosión y desgaste natural de mucho tiempo, mientras tanto los finos de la artificial provienen de la pulverización en un molino mineralógico que tarda unos cuantos minutos.

Los módulos de finura también son concordantes. La arena natural posee un valor de MF menor al de la artificial (3.026 para la natural vs 3.279 para la artificial, clasificando como **arena media gruesa**), pues los porcentajes retenidos acumulados de material en cada uno de los tamices hasta el N° 100 para el caso de esta arena se hacen menores al pasar una mayor cantidad hacia el tamiz N° 200 o la charola.

Sin embargo, estos resultados fueron lo suficientemente compatibles como para combinar ambos materiales sin la necesidad de realizar un re-proporcionamiento de los tamaños de partículas de la arena combinada por el método de la araña.

La prueba de **difractometría por rayos X** terminó de confirmar lo establecido en el apartado teórico, en donde se mencionó que los desechos tratados con el sistema PEMTM, sufren una reestructuración molecular que los hace adoptar, como estructura química final, la forma de un óxido metálico o combinaciones de orden superior de estos compuestos que generalmente contienen Calcio o Silicio. Para el caso de la muestra analizada, se identificó el Silicato de Calcio de la variedad α (α CaSiO₃) como el compuesto que más reaccionó ante la exposición de los rayos X.

Durante la preparación de las muestras que se utilizarían para determinar la resistencia a la compresión de los morteros hidráulicos a diferentes porcentajes de sustitución de arena artificial, se realizó a cada una de las mismas, inmediatamente después de terminar de mezclarlas, una prueba de flujo, conforme lo establece la norma ASTM C-230.

En dichas pruebas se observó como el flujo del material iba disminuyendo conforme se aumentaba la cantidad de arena artificial en la mezcla de mortero. Según los Cuadros 16, 19, 22, 25, 28 y 31, además de la Figura 42, los resultados de los flujos fueron variando en forma decreciente desde alrededor de un 119% (cumpliendo con los requerimientos de la norma ASTM C-270 para un mortero tipo S, de acuerdo con el Cuadro 3) hasta caer drásticamente en un 85.5% valor producido por la mezcla de 100% arena artificial.

Esta disminución en el flujo **no significa** que la arena artificial absorbe más agua y que por tanto posee un porcentaje de absorción mayor, en realidad, la muestra al 100% de sustitución de arena artificial se volvió muy poco trabajable y mucha del agua agregada en el proceso de mezclado escurrió en la mesa de flujo, ello demostraba que el agua no se retenía lo suficiente dentro del mortero.

Los resultados de resistencia promedio a la compresión de los diferentes porcentajes de sustitución de arena artificial también concordaron con lo anterior. De acuerdo con los Cuadros 17, 20, 23, 26, 29, 32 y 33 y las figuras 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40 y 41, la resistencia disminuyó de manera no muy significativa para las primeras cinco combinaciones de sustitución (La máxima resistencia se obtuvo para la arena con un 10% de sustitución de arena artificial, con 13.78 MPa contra 12.77 MPa para la que contenía un 70%, o sea, la diferencia es de 1 MPa entre los mismos).

De manera similar ocurrió con el resultado de la prueba de flujo, la mezcla que contenía un 100% de arena artificial no cumplió con las especificaciones para un mortero tipo S de la norma ASTM C-270, dando como resultado una resistencia promedio a la compresión de 10.32 MPa, cuando el mínimo establecido es de 12.5 MPa. Así las cosas, esta mezcla de mortero cumple con la resistencia para un mortero tipo N,

pero queda muy distanciada de los requerimientos mínimos de flujo (110%), característica esencial para garantizar una trabajabilidad efectiva en los morteros.

En general, todos los demás porcentajes de combinación de arena artificial y natural cumplieron con los requerimientos de la norma ASTM C-270, aunque para el caso de la muestra con un 70% de sustitución de arena artificial el valor del flujo es un poco inferior a la especificación, con 113.3%, cuando como mínimo se necesita un 115% para un mortero tipo S. En todo caso, aún así, esta mezcla puede ser satisfactoriamente clasificada como un mortero tipo N, apto también para uso estructural, aunque limitado a sistemas con capacidad mínima de disipación de energía en el rango inelástico.

De acuerdo con los resultados obtenidos en los diferentes ensayos, se procedió entonces a realizar la prueba práctica de campo, en la que se decidió utilizar una mezcla de mortero con un porcentaje de 50% de sustitución de arena artificial.

Se resolvió acudir a la experiencia de aquellos que son, a fin de cuentas, los que manipulan directa y diariamente las mezclas de mortero en sus diferentes aplicaciones en la construcción. Según las manifestaciones brindadas por el maestro de obras que trabajó con la mezcla al hacer dos paños de mortero para repello de aproximadamente 15 mm de espesor, uno en el interior de una habitación y el otro en un muro en el exterior, la misma posee **buenas condiciones de trabajabilidad y adherencia**, tanto para la cuchara como para las superficies existentes sobre las cuales se realizó el repello. Además, resaltó como característica positiva que el mortero físicamente no se diferencia en gran medida de uno convencional, pues posee un aspecto y una consistencia muy similar.

Una observación negativa identificada es que algunas partículas de la arena artificial, por provenir de un material vidrioso, poseen bordes filosos, que, aunque no son peligrosos para la salud, hacen un poco incómodo el manejo de los materiales cuando aún no se han mezclado con el agua.

Se recomienda por esta razón el uso de **guantes de cuero y lentes de seguridad** como adición al equipo básico de trabajo en campo.

Una vez terminados ambos paños de mortero, se observaron sus características durante siete días, rociándoles agua durante todo este tiempo para evitar el agrietamiento de los mismos por los efectos del calor de hidratación producidos por el proceso de fragua y/o por la pérdida de agua debida a la evaporación superficial o a la absorción de humedad de las paredes existentes que se han recubierto con los paños de repello.

Como resultado de estas observaciones en términos generales, se puede afirmar que las mezclas de mortero reaccionaron bien y **no presentaron problemas de agrietamientos, resquebrajaduras o mala adherencia a la superficie**. Ambos paños desarrollaron resistencias aceptables y su apariencia era agradable a la vista.

Para el caso de la presente investigación no se generó ningún costo al pulverizar la arena, pero es menester mencionar que si se decide aplicar este proceso de producción de arena artificial para morteros en forma comercial, se debe de diseñar e instalar una planta pulverizadora a gran escala de los precipitados sólidos. Es necesario tomar en cuenta todos los costos de operación de dicha planta, así como el personal calificado que controle y esté verificando constantemente la calidad de la arena que se produzca. Claro está, el costo de producción de este material es sumamente bajo al compararse con los de una arena natural. Como la materia prima es, básicamente, el remanente de un proceso de tratamiento de desechos, no es necesario pensar en gastos de extracción en canteras, maquinaria especializada ni en todos los costos directos e indirectos que acarrea la producción de una arena natural. La inversión inicial, suponiendo que se posee una planta de tratamiento de desechos con tecnología de plasma en suelo nacional, consistiría únicamente en la instalación y operación de la planta pulverizadora antes mencionada.

El valor comercial en el mercado nacional de la arena natural, de río o industrial es de

aproximadamente \$12/m³, mientras que si se implementa el sistema de producción de arena artificial como sustitución para mezclas de morteros hidráulicos podría reducirse considerablemente su costo, aproximadamente a \$6,5/m³, con una utilidad del 50% del costo de producción, la arena artificial podría venderse a \$10/m³, un precio considerablemente más bajo que el de la arena natural.

Al usar mezclas de arena natural y artificial (que, según los resultados obtenidos en esta investigación es lo más recomendable) se estaría disminuyendo en gran medida el consumo a nivel nacional de arena natural, material que en estos momentos escasea y su costo es un factor importante dentro del valor de los materiales en los presupuestos constructivos.

Por supuesto, al disminuir el consumo de las arenas naturales también se reduce el inevitable impacto ambiental que genera la industria de la extracción de agregados para la construcción sobre la naturaleza, terminando, de esta manera, de cerrar el ciclo de soluciones y reaprovechamiento de los materiales residuales que se generan a partir del sistema de tratamiento de desechos con tecnología de plasma.

Es siempre necesario tomar en cuenta que los resultados de las pruebas realizadas son aproximaciones a las condiciones reales. Los errores experimentales son muy propensos a presentarse y se manifiestan en errores humanos y/o de los aparatos de medición.

De esta manera, se puede llegar a la conclusión de que los resultados obtenidos durante los distintos ensayos practicados, tanto a la arena artificial como a las mezclas de mortero con diferentes porcentajes de sustitución de arena artificial, permitieron obtener un **parámetro efectivo de confiabilidad** para este nuevo material como uno de muchos posibles usos que se le puede dar dentro de la industria de la construcción.

Conclusiones

Las conclusiones más importantes obtenidas a partir de esta investigación son las siguientes:

- Se logró desarrollar un método de pulverización efectivo para los precipitados sólidos residuales provenientes del tratamiento de desechos con el sistema PEMTM.
- Se analizó la estructura química del precipitado sólido residual, el cual correspondió a α CaSiO₃ (Silicato de Calcio α).
- Al determinar las propiedades de la arena, se determinó que la arena artificial posee una gravedad específica de 2.48, mientras que la arena natural tiene una gravedad específica de 2.44.
- La arena natural absorbe más agua que la arena artificial. Con porcentajes de absorción de 4.51% y 4.23%, respectivamente.
- Las curvas granulométricas de ambas arenas se comportan de manera similar.
- La arena natural posee una cantidad de material fino mayor que la arena artificial. Con módulos de finura de 3.026 y 3.279, respectivamente.
- La resistencia promedio a la compresión de los morteros hidráulicos con diferentes porcentajes de sustitución de arena artificial es directamente proporcional al flujo de la muestra, siempre y cuando no se exceda en las cantidades mínimas estipuladas por la norma ASTM C-270.
- La resistencia promedio a la compresión de los morteros hidráulicos con diferentes porcentajes de sustitución de arena artificial

es inversamente proporcional al aumento del porcentaje de dicha arena.

- La muestra de mortero compuesta en su totalidad por arena artificial (100%), muestra valores muy bajos de flujo y trabajabilidad y una resistencia promedio a la compresión significativamente baja (10.32 MPa) al compararla con las demás mezclas examinadas (del orden de 13 MPa).
- Las mezclas de mortero con un 0%, 10%, 20% y 50% de sustitución de arena artificial son clasificadas como mortero tipo S, según la norma ASTM C-270. Los cuales son aptos para todo uso estructural.
- La mezcla de mortero con un 70% de sustitución de arena artificial es clasificada como un mortero tipo N, según la norma ASTM C-270.
- La mezcla de mortero con un 100% de sustitución de arena artificial no está dentro de los límites establecidos por la norma ASTM C-270, por su bajo valor de flujo.
- Se logró desarrollar correctamente la prueba práctica de campo con la mezcla cuyo porcentaje de sustitución era de un 50%.
- Las mezclas de mortero ensayadas durante la prueba práctica de campo no muestran evidencias de mala trabajabilidad o poca adherencia a las paredes existentes.
- Los paños de mortero de repello observados durante siete días de comportamiento no muestran signos de agrietamientos o resquebrajaduras de la superficie.

- Según los resultados de este estudios, sería factible, técnicamente, implementar a gran escala un proceso de producción de arena artificial por medio de una planta pulverizadora de los precipitados sólidos.
- El costo de producción de la arena artificial es aproximadamente \$4/m³ más bajo con respecto al de la arena natural. Este dato es sólo una estimación exploratoria para efecto de tener una referencia para este trabajo, sin embargo, este aspecto debe ser estudiado con mayor detalle posteriormente.
- Con el uso de esta arena se lograría una disminución del consumo de arena natural en el mercado nacional, con lo que se estaría reduciendo también el impacto ambiental que generan las plantas de extracción de agregados para la construcción.

Recomendaciones

Con el fin de asegurar una correcta continuidad de las labores investigativas, se recomiendan las siguientes acciones:

- Aumentar la cantidad de muestras y variaciones en porcentajes de sustitución de arena artificial.
- Si bien es cierto, durante el proceso de pulverización de los precipitados sólidos se obtuvo una arena artificial de características (granulometría, gravedad específica, módulo de finura) muy similares a las de la arena natural, es importante dejar claro que esto sucedió gracias a las condiciones que se presentaron con el material utilizado. En caso de que se utilice otro tipo de maquinaria, o haya una variación en el procedimiento de pulverización, existen muchas probabilidades de que las características de la arena artificial varíen, por lo que se recomienda hacer una caracterización detallada de la arena desde el punto de vista físico, químico y mecánico.
- La arena artificial mostró evidencias de poseer porcentajes de absorción similares a los de la arena natural. Sin embargo es necesario realizar más pruebas que permitan determinar si realmente posee una cantidad suficiente de poros internos en sus partículas que generan el almacenamiento de agua, o si esta característica corresponde a una adherencia del agua a la superficie de las partículas por magnetismo o cohesión superficial.
- Se recomienda hacer un estudio comparativo con arenas de diferentes procedencias del país y obtenidas por diferentes métodos de extracción.
- De igual forma se recomienda la realización de más pruebas de flujo a los morteros hidráulicos, esto para determinar con mayor exactitud la relación **agua/cemento** óptima para dichos morteros.
- Se recomienda hacer una prueba práctica de campo en paños de mortero mucho más grandes que los mostrados en la presente investigación. Esto con el fin de poder apreciar el comportamiento del repello en toda su dimensión.
- No se recomienda, por el momento, utilizar estos morteros hidráulicos en elementos estructurales, como pega de bloques o relleno de celdas. **Tampoco se le debe dar aún una aplicación comercial.** Únicamente se debe de utilizar, con fines experimentales, en repellos de paredes, ya que aún falta mayor investigación que permitan definir con certeza las características de este nuevo material.
- Es necesario realizar un estudio más profundo y detallado de los costos de producción de la arena artificial con respecto a la arena natural, que permita determinar con exactitud la factibilidad del proyecto.
- El precipitado sólido del cual se obtuvo la arena artificial para los morteros de este estudio, posee una gran cantidad de aplicaciones; por esta razón, se recomienda experimentar con el uso del mismo en otros materiales de construcción, como por ejemplo arenas y agregados gruesos para concretos, humos de sílice para cementos, adiciones en aleaciones de acero, y como material de relleno para bases de cimentaciones y/o superficies de rodamiento, entre otros.

Apéndices

Con el fin de completar la información, en este apartado se presenta el informe preparado y acreditado por el Laboratorio del Centro de Investigación y Extensión, de la Escuela de Ciencia e Ingeniería de los Materiales, del

Instituto Tecnológico de Costa Rica, donde se determina, por medio de un ensayo de difracción de rayos x, la composición química de la arena artificial que se usará en todos los ensayos de la presente investigación.

Anexos

Se adjunta la información con la que se preparó el capítulo en el que se explicó el sistema PEMTM, la misma fue conseguida a través de Internet, en la página oficial de la compañía ***Integrated Environmental Technologies, LLC***. Además, se presenta la teoría relacionada con la prueba de difracción realizada a la arena artificial.

Finalmente, se presentan los artículos publicados en los medios de comunicación sobre el convenio firmado entre la compañía Ad Astra Rocket Company y el Instituto Tecnológico de Costa Rica, quienes posibilitaron la realización de esta tesis.

Referencias

Herrera, A.; Madrid V.; 2006 **MANUAL DE CONSTRUCCIÓN DE MAMPOSTERÍA DE CONCRETO**. Colombia: Instituto Colombiano de Productores de Cemento. 166p.

American Standard for Testing Materials (ASTM).; **NORMAS C-127, C-128, C-117-04, C-136-05, C-702-98, C-109/C-109M-05, C-305-99, C-230/C-230M-03**. United States of America: ASTM International.

Chang, R. 2007. **PROCESO DE TRATAMIENTO DE DESECHOS PEMTM**. Alajuela, INCAE. Comunicación personal.

Montenegro, M. 2007. **TRABAJABILIDAD DE LA MUESTRA DE MORTERO CON UN 50% DE SUSTITUCIÓN DE ARENA ARTIFICIAL AL SER USADA COMO REPELLO SOBRE PAREDES EXISTENTES**. San José, Proyecto CDC. Comunicación personal.

Direcciones electrónicas en orden alfabético:

www.inentec.com

<http://usach.ch/icivil/laborat/revliteraria/compmort012>